FREIBURGER GEOGRAPHISCHE HEFTE

herausgegeben von Wolfgang Weischet

Heft 16

Konfiguration und Genese der Wärmeinsel der Stadt Freiburg

von

WILFRIED NÜBLER

1977

Im Selbstverlag des Geographischen Instituts I
der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.
Schriftleitung: Bernhard Metz
1979

Tauschverkehr, Auslieferung und Schriftwechsel:

Geographisches Institut I
78 Freiburg i. Br.
Werderring 4

FREIBURGER GEOGRAPHISCHE HEFTE

herausgegeben von Wolfgang Weischet

Heft 16

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41545301_0016

FREIBURGER GEOGRAPHISCHE HEFTE

herausgegeben von Wolfgang Weischet

Heft 16

Konfiguration und Genese der Wärmeinsel der Stadt Freiburg

von

WILFRIED NÜBLER

Im Selbstverlag des Geographischen Instituts I
der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.
Schriftleitung: Bernhard Metz
1979

ISSN 0071 - 9447

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Herstellung: Offsetdruckerei Johannes Krause, Freiburg i. Br.

VORWORT

Die vorliegende Untersuchung wurde als erste aus einer Reihe von unter Leitung von Prof. Dr. W. Weischet am Geographischen Institut I der Universität Freiburg durchgeführten Arbeiten zur Stadt- und Geländeklimatologie Anfang 1977 abgeschlossen. Ihr Ziel war es, mit moderner Untersuchungsmethodik und relativ breiter Datenbasis die Aussagen über die städtische Modifikation einiger klassischer Klimaelemente zu verfeinern und so zu einer Klimatologie charakteristischer Baustrukturtypen überzuleiten.

Herrn Professor Dr. Weischet möchte ich nicht nur für die Anregung zu dieser Arbeit und die zu Beginn tatkräftige Mithilfe — einschließlich der Teilnahme an Meßfahrten zu nachtschlafener Zeit —, sondern insbesondere für die fortgesetzte Anteilnahme und die Ermunterung während kritischer Phasen herzlich danken.

Zu Dank verpflichtet bin ich auch dem Leiter des Meteorologischen Instituts, Herrn Prof. Dr. A. Kessler, für die Anregungen im Verlauf der Seminare in seinem Institut und für die Erlaubnis, die Möglichkeiten der Werkstatt bei Bau und Ausbesserung der Meßapparatur zu nutzen. Letzteres wurde von Herrn Mechanikermeister H. Trick mit nie erlahmender Bereitwilligkeit erledigt. Ferner ist den Kollegen und Mitarbeitern im Geographischen Institut I zu danken, unter ihnen vor allem Herrn W. Hoppe für die sorgfältige Reinzeichnung der Karten.

Schon während der Arbeit an dieser Untersuchung und verstärkt in der Zeit zwischen Abschluß und Druck wurde von der klimatologischen Arbeitsgruppe im Geographischen Institut I das Problem der Nutzbarkeit von Fernerkundungsverfahren, v. a. Infrarot-Thermalaufnahmen, für klimatologische Fragestellungen bearbeitet (Befliegung 1973 und Teilnahme am Deutschen Flugzeugmeßprogramm 1976/77). Wegen Umfang und Terminierung dieser Arbeit wurden sie in die vorliegende Untersuchung, abgesehen von einer illustrierenden Ausnahme am Schluß, nicht einbezogen.

W. Nübler

INHALT

Vorwort V
Verzeichnis der Abbildungen IX
Verzeichnis der Tabellen X
Verzeichnis der Karten XI

A Stadtklima und Stadtklimatologie (Einleitung) 1
1. Die Bedeutung des Stadtklimas 1
2. Entwicklungstendenzen der Stadtklimatologie 2
3. Definitions- und Abgrenzungsfragen 4

B Qualitatives Modell des städtisch modifizierten Wärmehaushalts 8
1. Allgemeines 8
2. Strahlungsbilanz Q 9
3. Bodenwärmestrom B 12
4. Strom latenter Wärme V 13
5. Strom fühlbarer Wärme L 13
6. Anthropogene Wärmeproduktion A 14
7. Advektive Energietransporte 14
8. Zusammenfassung 15

C Untersuchung der Wärmeinsel der Stadt Freiburg 18
1. Methodische Möglichkeiten der Erfassung des Stadteinflusses auf die Lufttemperatur 18
1.1. Vergleich von Stadt- und Freilandstationen 18
1.2. Verdichtetes Stationsnetz 19
1.3. Meßfahrten 20
1.3.1. Anfänge der Meßfahrtechnik 21
1.3.2. Instrumentelle Verbesserungen 21
1.4. Vertikale Meßprofile 24
2. Verwendete Untersuchungsmethodik 24
2.1. Ortsfestes Stationsnetz 25
2.2. Meßfahrten 26
2.2.1. Meßapparatur - Aufbau 27
- Diskussion 30
2.2.2. Routenwahl 33
2.2.3. Meßtermine 34
2.2.4. Auswertung und Darstellung 35
3. Charakterisierung des Untersuchungsgebiets 37
3.1. Abgrenzung 37
3.2. Topographische Situation 37
3.3. Stadtentwicklung 38
3.4. Flächennutzung 39
4. Ergebnisse 39
4.1. Ortsfestes Stationsnetz 39
4.1.1. Vorbemerkung 39
4.1.2. Tagesgang der Lufttemperatur an 6 Stationen bei antizyklonalen Wetterlagen 40
4.2. Meßfahrten 43
4.2.1. Vorbemerkung 43
4.2.2. Synopsis der Isanomalenkarten 50
4.2.3. Einzelanalyse der Isanomalenkarten 53
4.2.4. Unterschiedliche Wärmeinseltypen (WI) 59

Typ 1: Normallage der WI 59
Typ 2: Normallage der WI mit W-E-Temperaturgradient im Bereich Wiehre 60
Typ 3: NW/N-Verlagerung des WI-Zentrums, aber Normallage der WI im Bereich Wiehre 61
Typ 4: NW-Verlagerung der Innenstadt WI, N-S-Gradient südlich der Altstadt 61
Typ 5: NW-Verlagerung des WI-Zentrums, ausgeprägte Kaltluftzunge im Dreisamtal 62
Sonderfälle – Südverlagerung der WI 63
– WI ohne Zentrum 63
– Keine WI (Mittagssituation) 64
4.2.5. Einzelbeispiele 65
4.2.6. Zusammenfassung 67
5. Diskussion der Ergebnisse 68

D Beitrag zum Problem des Höllentälers 76
1. Vorbemerkung 76
2. Der Höllentäler und die Geschichte seiner Beschreibung 76
3. Die Windverhältnisse in Freiburg nach neueren Untersuchungen 79
3.1. Die mittlere Windverteilung 80
3.2. Die tagesperiodische Änderung des Windfeldes 80
3.3. Eintrittszeit, Stärke und Richtungskonstanz vom Berg- und Talwind . . 90
3.4. Temperaturerhöhung durch den Höllentäler? 95

Zusammenfassung 100
Anmerkungen 101
Literatur 104

Verzeichnis der Abbildungen

1: Schema der Strahlungsströme im Vergleich Stadt-Freiland 12
2: Schematische Darstellung der Stadt-Freiland-Unterschiede der Wärmehaushaltsgrößen 17
3: Jahresgang der Differenz der Lufttemperatur zwischen Stadt und Freiland für vier Städte 19
4: Aufbau und Schaltplan der Meßapparatur, schematisch 26
5: Meßwagen mit montierten Psychrometern 27
6: Unterbringung der Apparatur im Meßwagen 27
7: Am Meßwagen installiertes Psychrometer 28
8: Schema zu Auswertung und Korrektur der Temperaturaufzeichnungen am 'Polycomp 2' 35
9 - 12: Tagesgang der Lufttemperatur an 6 Stationen in Freiburg bei antizyklonalen Wetterlagen 41
9: Winter (16. – 19. 1. 1972)
10: Frühling (16. – 19. 3. 1972)
11: Sommer (7. – 10. 7. 1972)
12: Herbst (21. – 24.10. 1971)
13: Gruppierung der Isanomalenkarten 50
14: Zusammenhang zwischen Wärmeinselintensität und Gesamtbewölkung 71
15: 15 a - f: Windfeld am 9. 3. 1972 83
15 g: Windfeld am 12. 2. 1972 89
16: Aufzeichnung von Windrichtung und -weg an den Stationen Ganter (8) und Haid (1) vom 20. – 25. 3. 1973 92
17: Temperatur und Feuchtegang vom 19. 3. 1973, 12 Uhr – 25. 3. 1973 24 Uhr an den Stationen C (Gärtnerei) und D (Mez) 96
18: Verteilung der Oberflächentemperatur am 1. 4. 1979, 4.39 Uhr (Scanner-Abtastung) 99

Verzeichnis der Tabellen

1: Prozentualer Anteil der Stadt- an der Gesamtbevölkerung in ausgewählten Ländern . . . 1

2: Prozentualer Anteil der Bewohner von Städten mit mehr als 20 000 EW an der Landesbevölkerung und seine vermutete Weiterentwicklung (für ausgewählte Erdteile) . . . 1

3: Unterschiedliche Bezeichnungsweise der Wärmehaushaltsgrößen . . . 8

4: Refelxionsvermögen α einiger Oberflächen für solare Strahlung ($< 4.0\ \mu m$) . . . 10

5: Emissionsvermögen $\in$ einiger Oberflächen im Infrarot ($4 - 100\ \mu m$) . . . 11

6: Wärmeleitfähigkeit $\lambda \cdot 10^3$ einiger Stoffe . . . 12

7: Anthropogene Wärmeproduktion A und mittlere Strahlungsbilanz Q für einige Städte . . . 15

8: Modifikation des Wärmehaushalts durch typische Stadtmerkmale . . . 16

9: Anzahl der Meßstationen einiger stadtklimatischer Untersuchungen . . . 20

10: Meßfahrten im Rahmen der Stadtklimatologie, technische Daten der neueren Untersuchungen . . . 22

11: Lage und Umgebung der Thermohygrographenstationen . . . 25

12: Flächengliederung der Gemarkung der Stadt Freiburg 1938 und 1970 . . . 39

13: Verzeichnis der Meßfahrten (Durchführungszeit, Temperaturkennwerte, Daten zur meteorologischen Situation) . . . 46

14 - 20: Unterschiedliche Wärmeinseltypen, Daten und wichtigste meteorologische Parameter

14: Wärmeinseltyp 1 . . . 60

15: Wärmeinseltyp 2 . . . 60

16: Wärmeinseltyp 3 . . . 61

17: Wärmeinseltyp 4 . . . 62

18: Wärmeinseltyp 5 . . . 62

19: Sonderfall 1 . . . 63

20: Sonderfall 2 . . . 63

21: Größte gemessene WI-Intensitäten . . . 69

22: Geringste gemessene WI-Intensitäten . . . 69

Verzeichnis der Karten

Karte 1: Meßfahrtrouten und Lage des Thermohygrographen-Stationen
" 2: Isanomalen der Lufttemperatur, abends - 3°, - 4°C
" 3: " " " , " - 2°C
" 4: " " " , " - 1°C
" 5: " " " , " 0°C
" 6: " " " , " +1°C
" 7: " " " , " +2°C
" 8: " " " , " +3°. . . +6°C
" 9: " " " , morgens - 3°, - 4°C
" 10: " " " , " - 2°C
" 11: " " " , " - 1°C
" 12: " " " , " 0°C
" 13: " " " , " +1°C
" 14: " " " , " +2°C
" 15: " " " , " +3°. . . +5°C
" 16: Areal dessen Lufttemperatur bei allen Meßfahrten über der des Bezugspunktes E lag.
" 17: Verteilung der Lufttempertaur am 22. 3. 73, 4.56 Uhr (Meßfahrt 61)
" 18: Verteilung der Lufttemperatur am 26. 3. 73, 20.45 Uhr (Meßfahrt 62)
" 19: Verteilung der Lufttemperatur am 27. 3. 73, 4.50 Uhr (Meßfahrt 63)
" 20: Verteilung der Lufttemperatur am 24. 9. 73, 22.27 Uhr (Meßfahrt 94)
" 21: Verteilung der Lufttemperatur am 25. 9. 73, 5.44 Uhr (Meßfahrt 95)
" 22: Verteilung der Lufttemperatur am 5. 10. 72, 19 Uhr (Meßfahrt 32)
" 23: Mittlere Windverteilung in Freiburg an 8 Stationen (August 1971 - Juli 1972)

A STADTKLIMA UND STADTKLIMATOLOGIE (EINLEITUNG)

1. Die Bedeutung des Stadtklimas

In den traditionellen Industrieländern leben zwischen 70 und 80 % der Einwohner in Städten. Auch in Ländern, die erst in jüngster Zeit eine intensive Wirtschaftsentwicklung durchgemacht haben, liegt der Anteil der Stadtbewohner an der Gesamtbevölkerung teilweise über 70 %. Selbst in gering entwickelten Ländern wachsen die Städte immer mehr an. 1960 wohnte ein Viertel der gesamten Erdbevölkerung in Städten mit mehr als 20.000 Einwohnern (SANTOS 1971). In den meisten Ländern wird der prozentuale Anteil der Stadtbevölkerung weiter zunehmen und auch in den Industrieländern werden, trotz stagnierendem Relativanteil, absolut gesehen immer mehr Menschen Stadtbewohner sein (UN 1969). Einige Belege für diese Entwicklung sind in Tab. 1 + 2 zusammengestellt.

Entsprechend stark haben sich die Städte ausgedehnt. Dauernd wachsende Flächen werden von Bebauung städtischen Charakters eingenommen. Anschauliche Beispiele sind die großflächige Erweiterung der deutschen Städte nach dem 2. Weltkrieg, das als „urban sprawl" aus Nordamerika bekannte Phänomen oder das explosionsartige Anschwellen der Metropolen in Ländern der dritten Welt.[1] – Aus klimatologischer Sicht bedeutet diese mit dem weltweiten Verstädterungsprozeß verbundene massive anthropogene Umgestaltung der Erdoberfläche eine Modifikation der Bedingungen an der Grenzschicht der Atmosphäre und damit eines der Faktoren, die das Klima eines Ortes steuern.

Damit ist doppelter Anlaß zu verstärkter Beschäftigung mit Fragen der Stadtklimatologie gegeben, denn
– immer mehr Menschen leben unter den Bedingungen städtisch modifizierten Klimas und
– immer größere Flächen wirken potentiell klimamodifizierend und immer noch sind die Phänomene dieser Veränderung der klimatischen Bedingungen ungenügend dokumentiert, die zugrundeliegenden Prozesse nur teilweise geklärt und die Frage nach der Bedeutung der Auswirkungen kaum gestellt.

Tabelle 1: Prozentualer Anteil der Stadt- an der Gesamtbevölkerung in ausgewählten Ländern.

	1920/21	1930/31	1940/41	1950/51	1960/61	1970
BR Deutschland	*	*	(70.5)	71.1	76.8	*
England + Wales	79.3	80.0	80.0	80.8	80.0	78.4
Japan	18.1	24.1	37.9	37.5	63.5	72.2
Schweden	29.5	32.5	44.4	47.5	72.7	81.4
USA	51.2	56.2	56.5	64.0	69.9	73.5
Chile	46.4	*	52.4	*	60.2	76.0
Venezuela	*	*	30.3	53.8	*	75.7

Quelle: UN, Demographic Yearbook, New York 1949 ff (verschiedene Ausgaben).

Definition der Stadtbevölkerung nach sehr unterschiedlichen Gesichtspunkten, für Europa i. d. R. Bewohner von Gemeinden mit > 2 000 EW (vgl. Anm.2), Erläuterungen z. B. Demogr. Yearbook 26 (1974) S. 151 – 155.

* = Es liegen keine nach vergleichbaren Gesichtspunkten ermittelten Daten vor.

Tabelle 2: Prozentualer Anteil der Bewohner von Städten mit > 20 000 EW an der Landesbevölkerung und seine vermutete Weiterentwicklung (für ausgewählte Erdteile).

	1920	1940	1960	1980	2000
Europa	35	40	44	49	55
Lateinamerika	14	20	33	43	54
Afrika	5	7	13	20	29
Südasien	6	8	14	19	26
Ostasien	7	9	12	26	33

Quelle: UN, Growth of the World's Urban and Rural Population. New York 1969.

2. Entwicklungstendenzen der Stadtklimatologie

Ohne Zweifel hat die durch die rasche Urbanisierung gesteigerte Aktualität mit dazu beigetragen, daß sich die Stadtklimatologie während der letzten Jahrzehnte von einer am Rande des Interesses liegenden Detailfrage zu einer selbständigen Teildisziplin der Klimatologie entwickelt hat. Diese Stellung ist gekennzeichnet durch die Erarbeitung spezifischer Fragestellungen und entsprechend spezialisierter Forschungsmethoden. Sie wird dokumentiert durch eine anschwellende Flut von Publikationen, wie sich aus dem Umfang der folgenden Bibliographien bzw. Forschungsberichten ablesen läßt, in denen die jeweils erschienene Literatur thematisch geordnet wurde: KRATZER, 1. Auflage 1937 (250 Titel); BROOKS 1952 (249 Titel); KRATZER, 2. Auflage 1956 (563 Titel); WMO 1970 a (rund 1600 Titel); OKE 1974 (380 Titel für die Zeit 1968 – 1973). Erreicht wurde diese selbständige Stellung spätestens mit dem Symposium „Urban Climates", das 1968 von der World Meteorological Organization in Brüssel veranstaltet wurde und zu einem einflußreichen Tagungsbericht (WMO 1970b) und einer von CHANDLER zusammengestellten Bibliographie (WMO 1970a) geführt hat.

Zwischen dem Brüsseler Symposium und den ersten Beschreibungen des Stadtklimas liegt eine Entwicklung, deren wichtigste Stationen sich etwa folgendermaßen charakterisieren lassen:

Schon sehr früh konnte HOWARD (1818, 1833) dank der günstigen Lage der Observatorien in London langjährige Temperatur – Meßreihen auswerten und zum erstenmal die in der Stadt höheren Lufttemperaturen instrumentell nachweisen. Um die Wende 19./20. Jh. begannn dann eine wenig systematische Suche nach „*Stadteffekten*" für alle nur denkbaren Klimaelemente wie Temperatur, Bewölkung, Niederschlag, Nebel, Sonnenscheindauer, Trübung der Atmosphäre, Staubgehalt, Luftelektrizität u.a.. Sie basierte meist auf dem einfachen Vergleich einer Stadt – mit einer Freilandstation.

Ende der 20er / Anfang der 30er Jahre folgten dann die ersten Versuche einer differenzierten Erfassung des Stadtgebiets und die Entwicklung spezieller Meßmethoden (Meßfahrttechnik, vgl. C 1.3) durch SCHMIDT (1927) in Wien, PEPPLER (1929) in Karlsruhe, STEINHAUSER (1932) und TOLLNER (1932) wiederum in Wien sowie BERG und METZLER (1934) in Hannover. Es ist das Verdienst KRATZERs, schon relativ früh den Versuch unternommen zu haben, das zahlreiche aber heterogene Material zu ordnen und zu kommentieren. Seine Monographie 'Das Stadtklima', die diese '*Sammelphase*' abschließt, erschien 1937 und dann in wesentlich erweiterter 2. Auflage 1956.

Bis dahin wurde die Entwicklung im wesentlichen von Meteorologen getragen. Nach dem 2. Weltkrieg waren es dann vor allem Geographen, die sich mit Fragen des Stadtklimas befaßt haben. Damit rückte der *räumliche Aspekt* in den Vordergrund. Jetzt folgte eine Phase, in der nicht mehr ein meteorologisches Einzelphänomen im Mittelpunkt steht, sondern die Charakterisierung des Klimas einzelner Orte anhand detaillierten Materials. So entstanden zahlreiche ausführliche Klimamonographien einzelner Städte. Methodisch wurden dabei

unterschiedliche Wege beschritten: BALCHIN und PYE (1947) in Bath, MAURAIN (1947) in Paris und PARRY (1956) in Reading bauten das traditionelle Verfahren mit festen Meßstationen aus. SUNDBORG (1951) in Lund stützte sich vorwiegend auf Meßfahrten. EMONDS (1954) in Bonn, CHANDLER (1961) in Leicester und (1962 a,b) in London und ERIKSEN (1964) in Kiel kombinierten beide Verfahren. DUCKWORTH und SANDBERG (1956) konnten in San Francisco und Palo Alto, Cal. außer Bodenmeßfahrten sogar schon eine Serie von Fesselballonaufstiegen durchführen, um die Besonderheiten der vertikalen Temperaturverteilung über Städten zu ermitteln.

Die zuletzt genannten – beginnend mit SUNDBORG – waren die wenigen und isolierten Pionierarbeiten der modernen Stadtklimatologie. Auf breiter Basis setzte die Forschung dann in den 60er Jahren ein. Der Schwerpunkt verschob sich dabei von Europa nach Nordamerika und die reine Meteorologie gewann wieder mehr an Gewicht.[3] Die maßgeblichen Gründe für die erneute *Intensivierung der stadtklimatologischen Forschung* sind die folgenden:

– *Bedeutungsgewinn und verbesserte institutionelle Voraussetzungen durch Einbeziehung in die 'Umweltforschung'.*
  Die Problematik des Umweltschutzes fand in kurzer Zeit starke Beachtung. Das wirkte allgemein stimulierend auf alle 'umweltrelevanten' Forschungsvorhaben. Seitens der Forschung wurchs die Neigung zur Behandlung anwendungsbezogener wissenschaftlicher Fragestellungen, seitens der verschiedensten Institutionen die Bereitschaft, solche Forschungen durch finanzielle Unterstützung überhaupt möglich zu machen. Beispielsweise wäre die großangelegte lokalklimatoloigsche Untersuchung, die ab 1970 von der Regionalen Planungsgemeinschaft Untermain (RPU) im Raum Frankfurt organisiert wurde, ohne diesen Umwelt–Stimulus nicht denkbar gewesen.[4]

  Eine zentrale Stelle innerhalb der allgemeinen Problematik nahmen dabei die Fragen der Luftverschmutzung und ihrer Beherrschung ein. Der Versuch, vom rein diagnostizierenden Feststellen der Luftverschmutzung zur Therapie (Luftreinhaltung) überzugehen, zeigte allerdings, daß Immissionsmessungen – meist auch noch in sehr schematischer, wetterlagen-unspezifischer Form, vgl. die Kritik von WEISCHET (1974) – kein Ersatz für die Kenntnis der atmosphrischen Prozesse sind, die die Ausbreitung und Verweildauer luftverunreinigender Substanzen beeinflussen. Damit gewann die Stadtklimatologie, der mehr an diesen Prozessen als an Fragen der Lufreinhaltung i.e.S. gelegen ist, an unmittelbarer praktischer Bedeutung.

  Beispielsweise für die von Luftreinhaltungs-Programmen ausgegangene direkte Anregung stadtklimatologischer Forschung sind die Arbeiten von KLUG (1965), DOMRÖS(1966), GEORGII (1970) und BACH (1969, 1971 a,b).

– *Ungenügende Datendichte*
  Gerade die Absicht, von der Deskription weiter zur Erklärung vorzudringen, zeigte aber, daß die Dichte auch der konventionellen klimatologischen Meßdaten zu gering ist, um zu verallgemeinerungsfähigen Aussagen über die klimamodifizierenden Wirkungen der Städte zu kommen. Die Notwendigkeit der Absicherung und Verbreiterung der Datenbasis anhand wiederholender Untersuchungen betonten zuletzt OKE (1974, S. 45) und ERIKSEN (1975, S. 83).

– *Verbesserte Methoden*
  Die durch technische Entwicklungen qualitativ verbesserte und vor allem komplikationsloser gewordene Messung der klassischen klimatologischen Parameter sowie die Möglichkeit der Messung früher, d. h. in der 'Sammelphase', unzugänglicher Elemente, wie z. B. Strahlungsbilanz, kamen auch der Stadtklimatologie zugute. Da Fragen der Meßtechnik später noch ausführlich behandelt werden, wird hier nicht weiter darauf eingegangen.

– *Weiterentwicklung theoretischer Konzepte (Wärmehaushalt)*
  Mit der Vervollkommnung der Meßmöglichkeiten steht die Weiterentwicklung theoreti-

scher Konzepte der Meteorologie und Klimatologie in enger Wechselbeziehung. Insbesondere das Konzept der Wärmehaushalt- bzw. Energiebilanzbetrachtung konnte mit verbesserten Meßmöglichkeiten immer weiter entwicklet werden, d. h. einzelne Energieumsetzungen konnten detaillierter nachgewiesen werden. Seit der umfassenden Übersicht von GEIGER (1. Auflage seines Stadardwerkes 1927, dann 1942, 1950, 1961) sind Wärmehaushaltsuntersuchungen ein zentraler Gegenstand der Erforschung der planetarischen Grenzschicht.[5]

Der Durchführung von Wärmehaushaltsuntersuchungen in städtischem Milieu stehen allerdings erhebliche Schwierigkeiten entgegen: Kleinräumige advektive Massen– und Energietransporte sind nur schwer in den Griff zu bekommen, deshalb versucht man normalerweise, sie durch möglichst großflächige Homogenität der Meßpunktumgebung auszuschalten – ein Verfahren, das in Städten offensichtlich nicht möglich ist. (Vgl. die Diskussion dieser Problematik in Abschnitt B). Aus diesem Grunde gibt es erst ansatzweise Versuche zur Erfassung der Energiebilanz des Systems Stadt/städtische Atmosphäre, z. B. von LANDSBERG und MAISEL (1972), OKE und FUGGLE (1972), TERJUNG (1970).

– *Modellrechnungen*
Einen weiteren Impuls erhielt die Stadtklimatologie durch die mit der Entwicklung der Datentechnik gegebene Möglichkeit der Berechnung von Modellen. Modelle sind dabei, im Sinne neuerer wissenschaftstheoretischer Ansätze (z. B. HAGGETT und CHORLEY 1967, S. 21 – 26 oder HARVEY 1969, S. 141 – 168), formalisierte, aber vereinfachte Abbilder von Strukturzusammenhängen eines Systems, das durch eine Theorie erklärt werden soll. Grundprinzip ist also, mit Hilfe weniger Eingangsgrößen und theoretischer, in Formeln faßbarer Vorstellungen über die zeitliche und/oder räumliche Variation klimatischer Parameter zu Prognosen des Wertes dieser Parameter zu einem anderen Zeitpunkt bzw. an anderem Ort zu kommen. Stimmen die Prognosen nicht mit der Beobachtung überein, muß das Modell verfeinert werden. Die 'Störung' der planetarischen Grenzschicht im Bereich von Städten ist zu einem bevorzugten Objekt dieses 'boundary-layer modelling' geworden. Die Pionierarbeit ist die von SUMMERS (1964); für die weitere Entwicklung sei auf die Darstellung bei OKE (1974, S. 70 – 97) verwiesen.

3. Definitions- und Abgrenzungsfragen

Da von der selbständigen Stellung der Stadtklimatologie gesprochen wurde, muß noch eine Definition gegeben und die Abgrenzung gegenüber anderen Teildisziplinen der Klimatologie erläutert werden. Die Diskussion erfordert eine gewisse Ausführlichkeit, da gerade die Fragen begrifflicher Abgrenzung in der Literatur häufig aufgeworfen, aber uneinheitlich beantwortet werden.

Es geht um eine grobe Standortbestimmung der Stadtklimatologie.

Was ist das Stadtklima? Die einfachste Antwort gibt KRATZER ([2] 1956, S. 1) mit einer schlichten Umschreibung:
„Wir verstehen darunter das der Stadt eigentümliche Klima, wodurch es sich von seiner Umgebung unterscheidet, welche klimatischen Eigentümlichkeiten sie hat, woher diese kommen, welche Ursachen sie haben." (sic)

Es geht also um die Frage:
„Welche Veränderung erleidet das Klima der Stadt durch die Besonderheiten der durch den Menschen geschaffenen Ballungsgebiete? "

Als Aufgabe der Stadtklimatologie wird also herausgestellt:
– Charakterisierung des Klimas einer Stadt, einschließlich individueller Besonderheiten.
– Vergleich mit dem Stadtumland.
– Begründung der festgestellten Unterschiede (die als anthropogene Klimamodifikation aufgefaßt werden können).

Will man nun das Stadtklima noch näher kennzeichnen und die Stadtklimatologie gegen andere Teilbeiche der Klimatologie abgrenzen, so stößt man zunächst auf das Hindernis der wuchernden Vielfalt von Wortverbindungen mit dem Suffix –klima. Sucht man sie zu ordnen, dann lassen sich, neben regional festgelegten Bezeichnungen wie Mediterran–, Passatklima u. ä., zwei Gruppen von Begriffen unterscheiden: Jene, die eine bestimmte fachliche Einengung klimatologischer Forschung oder einen spezifischen Anwendungsbereich ausdrücken. wie z. B. Strahlungsklima, Bestandsklima, Bioklima, und jene, die einen Bezug zur Größenordnung des betrachteten Gebiets aufweisen, wie z.B. Makro–, Meso–, Lokal– oder Mikroklima. Zu dieser letztgenannten Gruppe müssen die Begriffe Stadtklima und Geländeklima in Beziehung gesetzt werden.

Bei dieser Einordnung ist zunächst zu beachten, worauf z. B. HEYER ([2] 1972, S. 13) ausdrücklich hinweist, daß das Klima als solches natürlich nicht von der Größenordnung des betrachteten Gebiets abhängt. Vielmehr ist das Bedürfnis nach nomenklatorischer Unterscheidung auf die letztlich in jeweils spezifischen Erfassungsmethoden begründete unterschiedliche Betrachtungsweise zurückzuführen. Erst sekundär ist dann die Rückwirkung auf die Dimension des betrachteten Gebiets: Detaillierte Erfassung zwingt zu räumlicher Beschränkung, generalisierende Methodik ermöglicht großräumigen Überblick.[7]

Ausgehend von dieser Überlegung wurde eine methoden– und größenordnungsabhängige Hierarchie klimatologischer Betrachtungsweisen entwickelt. Zunächst schien eine Teilung in Makro– und Mikroklima ausreichend. Mit dem Vordringen der letzteren zu immer oberflächennäheren Phänomenen zu Beginn des Jh., repräsentiert etwa durch die Arbeiten GEIGERs und seine begriffsbildende Zusammenfassung in „Klima der bodennahen Luftschicht" von 1927, hat sich dann allerdings die Notwendigkeit einer Zwischenstufe gezeigt. Die Dreigliederung in Makro–, Meso– und Mikroklimatologie hat sich – nicht zuletzt wegen der problemlosen Übersetzbarkeit– weitgehend durchgesetzt.

Dabei erfaßt die *Makroklimatologie* mit einem weitmaschigen Netz standardisierter Meßstationen das Klima außerhalb der bodennahen Luftschicht. Ziel ist die großräumige Vergleichbarkeit, die nur bei Ausschaltung lokaler Faktoren erreicht werden kann. Die *Mikroklimatologie* dagegen erfaßt mit speziellen Meßmethoden das Klima der bodennahen Luftschicht, die bei makroklimatischer Betrachtung bewußt ausgespart bleibt. Diese Schicht ist gekennzeichnet durch infolge erhöhter Reibung reduzierten Massen – und Energieaustausch durch kleinräumig wechselnde Oberflächeneigenschaften und infolgedessen durch starke Variation aller klimatologischen Elemente.

Zwischen diesen Extremen ist die *Mesoklimatologie* anzusiedeln, die sich der Räume annimmt, die einerseits unterhalb der Maschenweite des makroklimatischen Netzes liegen, andererseits durch ihre Größe einer detaillierten makroklimatischen Betrachtung nicht zugänglich sind. Es handelt sich dabei um Räume, die in sich geschlossen und von ihrer Umgebung abgesetzt sind, oder, wie WEISCHET (1956, S. 121) formuliert, um den „Einflußbereich einer speziellen, einfach auftretenden topographischen Einzelform". Ergänzend dazu läßt sich die absolute Größe solcher Formen mit dem Bereich km – 10er km angeben. Es ist offensichtlich, daß die von der Stadtklimatologie zu behandelnden Objekte in diesen Größenordnungsbereich fallen. „Das Stadtklima ist ein typisches Mesoklima" (KRATZER [2] 1956, S. 2). ERIKSEN (1964, S. 18) bemängelt zu Recht an dieser Formulierung KRATZERs, daß das Mesoklima nicht näher definiert sei und präzisiert deshalb das

> „Stadtklima (als) ein Meso– oder Lokalklima, das die unter dem Einfluß der örtlichen Besonderheiten der vor allem von städtischer Bebauung geformten Erdoberfläche stehende lokale Ausprägung des Klimas unter– und oberhalb einer Höhe der Luftschicht von 2 Metern darstellt."

Wie KRATZER ordnet also auch ERIKSEN das Stadtklima der Lokal– oder Mesoklimatologie zu. Dem ist voll zuzustimmen. Durch die logisch unglückliche, weil trotz ihres ein-

schränkenden Charakters alles umfassende Formulierung am Ende des Zitats möchte ERIKSEN bewußt das Mikroklima in das Stadtklima miteinbeziehen. Faßt man das Mikroklima im oben erläuterten – auch von ERIKSEN akzeptierten – Sinne auf, ist das nicht unproblematisch. Denn die Grundlage mesoklimatischer Messungen bleiben auch im städtischen Milieu die Werte aus normalen abgeschirmten meteorologischen Stationen in 2 m Höhe und von nach ähnlichen Gesichtspunkten konstruierten Meßfahrtgeräten. Die bloße Verdichtung der Datenbasis in Form von Stationssondernetzen oder Meßfahrten bedeutet aber noch kein Eindringen in den Grenzbereich zwischen Erd–, Straßen–, Haus– oder Vegetationsoberfläche und auflagernder Luftschicht. Und gelegentliche stichprobenartige Erweiterungen in diesen Bereich hinein rechtfertigen keinen generellen Einschluß der Mikroklimatologie. Alle stadtklimatischen Arbeiten, die ERIKSENs nicht ausgenommen, bestätigen den Satz KRATZERs ([2] 1956, S. 2):

> „Die Stadtklimaforschung befaßt sich nicht in erster Linie, sondern nur gelegentlich mit dem eigentlichen Mikroklima: dem Klima der bodennahen Luftschicht."

Erst in jüngster Zeit bietet sich mit der planmäßigen Erschließung neuer, insbesondere radiometrischer Untersuchungsmethoden (Fernerkundungstechnik) erstmals die Möglichkeit, innerhalb stadtklimatischer Forschungsprogramme mehr als nur stichprobenhaft in den mikroklimatischen Bereich vorzustoßen. Mit der genannten Einschränkung kann man deshalb die von ERIKSEN ohne nähere Begründung vorgeschlagene Einbeziehung des Mikroklimas akzeptieren.

Damit ist die untere Grenze des Rahmens der Stadtklimatologie abgesteckt. Die obere muß im Zusammenhang mit einem von WEISCHET (1956) entwickelten Konzept der „räumlichen Differenzierung klimatologischer Betrachtungsweisen" erläutert werden. Er hatte in dem Bemühen, die klimatologische Raumdifferenzierung der Rangordnung der geographischen Naturlandschaftsgliederung anzupassen, das oben beschriebene dreistufige System durch Einführung einer vierten Stufe präzisiert. Danach steht das Subregionalklima zwischen Lokal– und Regional– bzw. Meso– und Makroklima und soll den mehrdeutigen Begriff Geländeklima ersetzen. So ergibt sich folgende Rangstufung (die Terminologie GEIGERs ist zum Vergleich mitaufgeführt):

WEISCHET (1956, S. 121)		*GEIGER ([4] 1961, S. 477)*
– Regionalklima = Makroklima	1 : 1 Mill. und kleiner	Makroklima
– Subregionalkl. (= Geländekl.)	1 : 100000 – 1 : 1 Mill.	
– Lokalkl. = Mesokl.	1 : 50000	Geländeklima 1 : 10000 – 1 : 25000
– Mikroklima	–	Mikroklima

Die angegebenen Maßstäbe für die jeweils adäquate kartographische Darstellung geben einen Hinweis auf die mögliche Ausdehnung des in der jeweiligen Größenstufe erfaßbaren Areals. Hieraus, und aus der von WEISCHET (1956, S. 121) gegebenen Charakterisierung des Subregionaklimas als „Klima im Bereich der superponierten Einflüsse mehrfach, in bestimmtem Verbreitungsgefüge auftretenden Formen der Erdoberfläche und Oberflächenbedeckung" wird deutlich, daß das Stadtklima im Normalfall nicht unter diese Kategorie fällt. Lediglich im Fall der Behandlung ausgedehnter Städteagglomerationen, etwa des Ruhrgebiets, die dann entsprechend generalisiert ausfallen müßte, könnte man von einem städtisch geprägten Subregionalklima sprechen.

Eine Änderung dieses klaren Systems schlägt ERIKSEN (1975) vor. Er will Stadt– und Geländeklima als ranggleiche räumliche Differenzierungsstufen aufgefaßt wissen. Um den eingeführten Begriffsumfang des Ausdrucks Geländeklima nicht ungerecht zu werden, müssen

dabei – mit ausdrücklichem Bezug auf WEISCHET – beide Termini dem Subregionalklima zugeordnet werden. Das ist aber schlecht vereinbar mit der üblichen Einstufung des Stadtklimas, dessen Zuordnung zum Subregionalklima, wie oben beschrieben, nur im Ausnahmefall gerechtfertigt ist. Wohl um diesem Dilemma zu begegnen, ersetzt deshalb ERIKSEN (1975, S. 5) in seiner bereits zitierten (vgl. S. 5), sonst wörtlich übernommenen Definition des Stadtklimas von 1964 die Formulierung „Meso– oder Lokalklima" durch „ Subregionalklima (= Mesoklima)". Diese Gleichsetzung von Subregional– und Mesoklima ist irreführend, weil sie, wie ein Blick auf die von WEISCHET (1956) vorgeschlagenen Begriffe und deren von ihm angegebenen Synonyme (s. o.) zeigt, aus der vierstufigen wieder eine dreistufige Rangordnung macht. Das ist aber wohl auch nicht im Sinne ERIKSENs, da er ja eigens seine alte Definition änderte, um den von WEISCHET begründeten Zwang zu einer vierstufigen Rangordnung und den damit verbundenen Terminus Subregionalklima zu berücksichtigen.

Derartige Ungereimtheiten könnten m.E. vermieden werden, indem man die primär Größenordnungen klimatologischer Betrachtungsweisen ausdrückende Begriffe Regional– (= Makro)klima bis Mikroklima deutlich von den primär objektbezogenen Termini Stadt– bzw. Geländeklima trennt. Es bliebe dann neben einer grundsätzlichen Zuordnung des Stadtklimas zum Meso– (=Lokal)klima und des Geländeklimas zum Subregionalklima die Freiheit, im Einzelfall auch anders zu verfahren, also z. B. das Stadtklima in subregionalem und das Geländeklima in lokalem Rahmen zu betrachten. (Insbesondere das letztere wird auch häufig praktiziert: Die Methodik der Landesklimaaufnahme nach KNOCH (1963) ist hier einzuordnen. Vgl. LESER (1973). Bei GEIGER entspricht das Geländeklima sogar, wie oben angegeben, explizit dem Lokalklima.)

B QUALITATIVES MODELL DES STÄDTISCH MODIFIZIERTEN WÄRMEHAUSHALTS

1. Allgemeines

Grundlage der Existenz eines besonderen Stadtklimas ist der unterschiedliche Wärmehaushalt städtischer und nicht-städtischer 'natürlicher' Oberflächen. Verfolgt man die potentielle Wirkung der spezifisch städtischen Oberflächencharakteristika auf die Komponenten des Wärmehaushalts im Sinne von GEIGER ([4] 1961) oder BUDYKO (dt. 1963), lassen sich wichtige qualitative Einsichten in die physikalischen Grundlagen des Stadtklimas gewinnen. Zugleich wird an der Komplexität der Zusammenhänge deutlich, welche Schwierigkeiten einer quantitativen Erfassung einzelner Energieumsetzungen bis heute entgegenstehen, so daß die Untersuchung klimatologischer Effekte dieser Umsetzungen immer noch den Schwerpunkt stadtklimatischer Forschung bildet. Deshalb sollen in einer kurzen Durchmusterung die einzelnen Elemente des Wärmehaushalts im Hinblick auf ihre spezielle Ausprägung im städtischen Bereich dargestellt werden, zumal in der deutschsprachigen allgemeinen Literatur zum Stadtklima von diesem Konzept bisher kaum Gebrauch gemacht wurde (Ausnahme: KESSLER, 1971; In der englischen Literatur erster Hinweis bei MUNN, 1966, dann LANDSBERG, 1974 und OKE, 1975).

Der Wärmehaushalt eines Stadtgebiets kann durch die Energiebilanzgleichung in folgender Form ausgedrückt werden:

$$Q + B + L + V + A = 0 \qquad (1)$$

Sie besagt, daß sich für jeden Zeitpunkt die folgenden Energieflüsse durch die Grenzfläche Atmosphäre / Erd— bzw. Stadtoberfläche, die alle positiv (Energietransport zur Grenzfläche) oder negativ (Energietransport weg von der Grenzfläche) sein können, zu Null ergänzen: Die Strahlungsbilanz (Q), der Bodenwärmestrom (B), die Ströme fühlbarer (L) und latenter Wärme (V) und der aus anthropogen bedingten Energiefreisetzungen resultierende Energiefluß (A).

In der Bezeichnungsweise halte ich mich, abgesehen von dem zusätzlich eingeführten A, an die von MÖLLER (1973) und der Münchener Schule verwendeten Symbole, ohne dadurch eine begründbare Vorliebe ausdrücken zu wollen. Leider ist gerade bei den Wärmehaushaltsgrößen eine internationale oder auch nur nationale Standardisierung noch nicht erfolgt wie Tabelle 3 zeigt:

Tabelle 3: Unterschiedliche Bezeichnungsweisen der Wärmehaushaltsgrößen

		Strahlungsbilanz	Bodenwärmestrom	Strohm fühlbarer Wärme	Strom latenter Wärme	Anthropogene Wärmeproduktion
GEIGER	[4]1961	S	B	L	V	—
SELLERS	1965	R	G	H	LE	—
MUNN	1966	Q_N	Q_G	G_H	Q_E	—
FLOHN	1968	Q	T_B	T_L	T_V	—
SMIC-Report	1971	Q_S	F_G	F_A	F_L	—
FRISKEN	1973	R_N	G	S	H	F
KESSLER	1973	R	B	L	V	—
MÖLLER	1973	Q	B	L	V	—
LANDSBERG	1974	Q_N	Q_S	Q_H	Q_E	Q_P
OKE	1975	Q*	Q_G	G_H	Q_E	Q_F

Besonders unglücklich ist, daß zwar häufig dieselben Buchstaben verwendet werden, jedoch in welchselnden Kombinationen. Q wird außer in den hier angegebenen Bedeutungen noch zur Kennzeichnung advektiver Wärmetransporte (bei GEIGER) und für die direkte Sonnenstrahlung (bei SELLERS und KESSLER) benutzt. International scheint sich die Bezeichnungsweise von LANDSBERG oder OKE durchzusetzen, bei der Q allgemein für einen Energiefluß ($cal \cdot cm^{-2} \cdot min^{-1}$ bzw. $W \cdot m^{-2}$) steht und die genauere Kennzeichnung durch Index erfolgt.

Der Faktor (A), der die aus Verbrennungsvorgängen (Industrie, Hausbrand, Kraftfahrzeuge, aber auch Stoffwechselvorgänge) resultierenden Energiemengen umfaßt, muß bei städtischen Energiebilanzen — gegenüber der sonst üblichen Form — in die Gleichung mit aufgenommen werden, da die anthropogen freigesetzten Energiemengen in Städten gegenüber der Strahlungsbilanz nicht mehr vernachlässigbar sind (vgl. FLOHN, 1973). Vernachlässigt werden dagegen in der gegebenen Form z. B. Energiegewinne oder -verluste aus Niederschlag, Schmelzen von Schnee, Bodenreibung des Windes. Die Dimension der Energieflüsse, d. h. Energiemenge pro Fläche— und Zeiteinheit, ist $cal \cdot cm^{-2} \cdot min^{-1}$ oder $W \cdot m^{-2}$.

Durch Erläuterung der die einzelnen Energiebilanzanteile beeinflussenden Faktoren werden im folgenden die Besonderheiten des städtischen Wärmehaushaltes aufgezeigt.

2. Strahlungsbilanz Q

Der Erdoberfläche wird kurzwellige solare Stralung (ca. 0.3 — 2.2 μm) zugestrahlt (KW↓); ein Teil davon wird in die Atmosphäre reflektiert (KW↑). Die Erdoberfläche selbst strahlt langwellig (ca. 4 — 100 μm) aus (E = LW↑) erhält aber im gleichen Wellenlängenbereich auch Gegenstrahlung (G = LW↓)* aus der Atmosphäre. Die Strahlungsbilanz als Nettogewinn oder —verlust der zu betrachtenden Fläche lautet demnach:

$$(2) \qquad Q = KW\downarrow - KW\uparrow + LW\downarrow - LW\uparrow.$$

Im einzelnen gilt $KW\downarrow = I + H$ und
$KW\uparrow = (I + H)\,\alpha$

d. h. bei der kurzwelligen Zustrahlung (= Globalstrahlung) ist zwischen direkter solarer Strahlung (I) und diffuser Himmelsstrahlung (H) zu unterscheiden. Die Größe des reflexierten Anteils wird durch das Reflexionsvermögen α (Albedo) der bestrahlten Oberfläche bestimmt. Es ist also

$$(3) \qquad KW\downarrow - KW\uparrow = (I+H)\,(1-\alpha).$$

Ferner gilt $LW\uparrow = E = \epsilon\,\sigma\,T^4$, d. h. die Emission E der Erdoberfläche hängt nach dem STEFAN und BOLTZMANNschen Gesetz von ihrer Temperatur T (in Kelvin) und dem Emissionsvermögen ϵ ab ($\sigma = 0.826\ 10^{-10}$ cal cm $^{-2}$ min $^{-1}$ grd $^{-4}$, Stefan—Boltzmann—Konstante). Mit der Gegenstrahlung $LW\downarrow = \epsilon G$ ist dann

$$(4) \qquad LW\downarrow - LW\uparrow = \epsilon G - \epsilon\sigma T^4 = \epsilon\,(G - \delta T^4)$$

In aufgeschlüsselter Form ist anstelle von (2) also zu schreiben:

$$(5) \qquad Q = (I+H)\,(1-\alpha) + \epsilon(G - \sigma T^4).$$

In welcher Weise beeinflussen die charakteristischen Merkmale einer Stadt die in (5) aufgeführten Faktoren, so daß sich Stadt—, Freiland—Differenzen* in der Strahlungsbilanz ausbilden können?

* Bei Gegenüberstellungen werde ich im folgenden diese Kürzel verwenden, wobei 'Freiland' für vorwiegend offene, vegetationsbedeckte 'natürliche' Oberflächen steht und 'Stadt' für die aus Baumaterialien aller Art zusammengesetzten, boden— und vegetationsarmen 'künstlichen' Oberflächen.

Durch zahlreiche *Emittenten* ist die Luft über Städten stärker mit gasförmigen und festen Stoffen belastet. Die Globalstrahlung wird dadurch insgesamt gegenüber einer 'sauberen' Freilandstation um 8 – 30 % gemindert (LANDSBERG 1974, S. 748), der Anteil von H an (I+H) wird durch die stärkere Streuung insbesondere der kurzen Wellen aber erhöht (vgl. die Zunahme des Trübungskoeffizienten mit dem Wachstum der Städte auf knapp den doppelten Wert zwischen 1930 – 1960, FLOHN 1973, S. 18, Tab. 1). Andererseits wird durch die *Hochbauweise* die absorbierende Fläche insgesamt vergrößert und durch das Vorherrschen *vertikaler Flächen* kann auch flach einfallende direkte Strahlung stärker absorbiert werden. Allerdings werden dadurch auch *Schatten* verursacht, die nur für H zugänglich sind. In Straßenschluchten ist außerdem durch Mehrfachreflexion eine stärkere Absorption möglich.

In Städten herrschen *Baumaterialien* wie Beton, Asphalt, Ziegel, Kies, Teer etc. vor. Damit verändern sich gegenüber dem Freiland die Reflexionseigenschaften für kurzwellige Strahlung. Wie Tab. 4 zeigt, liegen die α–Werte aber durchaus im Rahmen der von natürlichen Oberflächen bekannten Verhältnissen.

Tabelle 4: Reflexionsvermögen α einiger Oberflächen für solare Strahlung (<4.0 μm).

Quelle: SELLERS 1965, S. 21,
MÖLLER 1973, Bd. 2, S. 42.

frischer Schnee	0.8 – 0.9
alter Schnee	0.4 – 0.6
Boden (je nach Feuchtegehalt und Zusammensetzung)	0.05 – 0.45
Rasen	0.25
Laubwald	0.1 – 0.2
Nadelwald	0.05 – 0.15
Wasserflächen	0.03 – 0.1
Beton	0.17 – 0.27
Asphalt	0.05 – 0.1

Die von LANDSBERG (1974, S. 727) geäußerte Vermutung, die städtische Albedo sei gewöhnlich geringer als die des Freilandes, gilt sicher nicht allgemein, z. B. wenn das Freiland einen hohen Waldanteil aufweist. Als Mittelwert aus den Ergebnissen mehrerer Autoren gibt OKE (1975, S. 10) neuerdings $\alpha = 0.15$ als für Städte typischen Wert an. D. h. Städte reflektieren etwa wie Laubwald, sie sind 'heller' als feuchte natürlich Oberflächen oder Nadelwald, aber 'dunkler' als die meisten sonstigen Vegetations– oder Bodenoberflächen.

Eindeutige Unterschiede in den Reflexionseigenschaften verursacht die in Städten geringere *Schneedeckenandauer:* Die noch zu erläuternde Wärmeinsel der Stadt führt zu schnellerem Abschmelzen der Schneedecke, die Stadt kann dadurch mehr kurzwellige Strahlung absorbieren. Es handelt sich also um einen Effekt mit Selbstverstärkung. Ein anschauliches Beispiel gibt LINDQUIST (1968) aus Lund.

Vom langwelligen Anteil an der Strahlungsbilanz wird v. a. die terrestrische Ausstrahlung ($\varepsilon\sigma T^4$) im infraroten Teil des Spektrums (4 – 100 μm) durch die Stadt verändert. Zwar sind die *Unterschiede im Emissionsvermögen* zwischen künstlichen und natürlichen Oberflächen gering. Beide absorbieren fast die gesamte langwellige Strahlung und wirken damit als nahezu schwarze Strahler, wie aus Tab. 5 hervorgeht:

Tabelle 5: Emissionsvermögen ϵ einiger Oberflächen im Infrarot (4 – 100 μm)

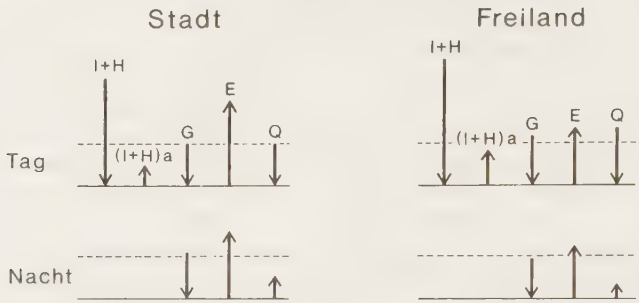
Quelle: SELLERS 1965, S. 41
MÖLLER 1973, Bd. 2, S. 49.

frischer Schnee	0.95
feuchter Sand	0.95
Boden	0.90 – 0.98
Wasser	0.96
Wald	0.90
Beton	0.88
Kies, Kalkstein, Ziegel	0.92
weißer Putz	0.91
Anstrichfarbe (weiß oder schwarz)	0.95

Die gegenüber natürlichen Oberflächen größere Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität (vgl. unten B 3) von Beton, Asphalt u. a. bedingt aber *höhere Oberflächentemperaturen* und damit stärkere Ausstrahlung. Das gilt nicht nur nachts, wennn die tagsüber gespeicherte Energie für höhere Oberflächentemperaturen sorgt. Der Ausstrahlungsverlust der Stadt ist vielmehr mittags am größten (LANDSBERG und MAISEL, 1972). Inwieweit dieser Verlust durch stärkere Gegenstrahlung (ϵG) aus der Atmosphäre über Städten kompensiert wird, ist nicht ganz klar. Lange Zeit war es üblich, mit der folgenden Argumentationskette die städtischen Wärmeinseln zu begründen: Die städtische Atmosphäre ist stärker verschmutzt, sie kann also mehr von der langwelligen Ausstrahlung der Erdoberfläche absorbieren, heizt sich dadurch stärker auf und emittiert entsprechend mehr langwellige Strahlung. Der als Gegenstrahlung zur Erdoberfläche gelangende Anteil ist deshalb größer als im Freiland und trägt zum Wärmeüberschuß der Städte bei. OKE und FUGGLE (1972) haben zuerst darauf hingewiesen, daß diese Argumentation ebensogut umgekehrt werden kann: Aus dem Vergleich von Gegenstrahlungs–Meßfahrten in Montreal und Berechnungen der Gegenstrahlung nach verschiedenen empirischen Verfahren schließen sie, daß nicht die erhöhte Gegenstrahlung Ursache der städtischen Wärmeinsel ist, sondern umgekehrt die aus anderen Ursachen, insbesondere aus dem großen positiven Bodenwärmestrom, zu erklärende Wärmeinsel stärkere langwellige Abstrahlung, dadurch vermehrte Absorption in der städtischen Atmosphäre und entsprechend erhöhte Gegenstrahlung bedingt. Eine endgültige Bestätigung dieser Auffassung steht noch aus. Sicher ist nur, daß die Gegenstrahlung verglichen mit dem Freiland in Städten geringfügig größer ist.

Alle aufgeführten Einzelfaktoren des Strahlungshaushalts werden also durch die Besonderheiten der Oberflächen und der Atmosphäre in Städten gegenüber dem Freiland verändert. Durchschnittlich geringerer solarer Zustrahlung steht die bessere Ausnutzung der Zustralung infolge durchschnittlich geringerer Albedo gegenüber. Die langwelligen Strahlungsströme sind in der Stadt beide verstärkt, die Ausstrahlung allerdings mehr als die Gegenstrahlung. Nachts, wenn die Strahlungsbilanz nur vom langwelligen Anteil gebildet wird, verliert die Stadt mehr Energie als das Freiland. Tagsüber, bei allgemein positiver Bilanz ist ihr Gewinn geringer. Diese qualitativen Aussagen, für die es wegen der schwierigen und immer nur für kleine Areale repräsentativen Messungen erst wenig quantitative Belege gibt (BACH und PATTERSON, 1969, wegen Instrumenten mit Toleranzen in Größe der Meßwerte von beschränkter Aussagekraft; OKE und FUGGLE, 1972; LANDSBERG und MAISEL, 1972), sind in Abb. 1 schematisch zusammengefaßt. Die Länge der Pfeile gibt dabei die ungefähren Proportionen der einzelnen Strahlungsströme wieder, die Pfeilrichtung zeigt Strahlungsgewinn (zur Oberfläche) bzw. –verlust (von der Oberfläche weg) an.

Abb. 1: Schema der Strahlungsströme im Vergleich Stadt — Freiland



Trotz Modifikation aller Elemente des Strahlungshaushalts sind die Stadt—Freiland—Differenzen der Strahlungsbilanz gering und im Ergebnis so, daß eine positive Anomalie der Lufttemperatur in Städten (Wärmeinsel) daraus nicht erklärt werden kann. Die Ursachen für dieses Phänomen müssen also bei den anderen Gliedern der Energiebilanz gesucht werden, die ebenfalls signifikante Unterschiede zwischen Stadt und Freiland aufweisen:

3. Bodenwärmestrom B

Bei positiver Strahlungsbilanz wird im Normalfall ein Teil des Energieüberschusses für die Verdunstung (V) bzw. für konvektiven Wärmetransport (L) verbraucht. Der Rest muß als Bodenwärmestrom (B) in den Untergrund abgeführt und dort als Wärme gespeichert werden. In der Stadt ist der Terminus Bodenwärmestrom nicht ganz glücklich, weil hier selbstverständlich auch Energietransporte in Gebäude Straßendecken etc. hinein bzw. von diesen weg miteingeschlossen sind.

Die Fähigkeit, Wärme zu speichern, hängt vom vertikalen Temperaturgradienten ($\frac{dt}{dx}$; mit Temperatur t in °C und Tiefe x in cm) und von der Wärmeleitfähigkeit λ ab:

$$(6) \qquad B = \lambda \cdot \frac{dt}{dx} \qquad \left[cal \cdot cm^{-2} \cdot sec^{-1}\right] \text{ bzw. } \left[W \cdot m^{-2}\right]$$

Der Proportionalitätsfaktor mit der Dimension $cal \cdot cm^{-1} \cdot sec^{-1} \cdot grd^{-1}$ bzw. $W \cdot cm^{-1} \cdot grd^{-1}$ bezeichnet die Wärmemenge, die in der Zeiteinheit durch eine Flächeneinheit einer Schicht von der Dicke einer Längeneinheit strömt. λ ist eine Materialkonstante, ihr Wert ist für einige Stoffe in Tab. 6 angegeben.

Tabelle 6: Wärmefähigkeit $\lambda \cdot 10^3$ einiger Stoffe

Quelle: GEIGER [4] 1961, S. 33 ;
MUNN 1966, S. 34.

Eisen	16.0
Beton	11.0
Granit	6.5
Mauerwerk	1.5
Wasser, unbewegt	1.4
Neuschnee	0.2
feuchter Lehmboden	2.0 – 5.0
trockener Boden	0.4 – 0.8
Trockenes Moor	0.1 – 0.3
Luft, unbewegt	0.05

Kompakte Stoffe, wie sie in der Stadt vorherrschen, sind also gute Wärmeleiter. Das Freiland ist dagegen geprägt von Stoffen mit hohem Volumenanteil des Isolators Luft, die Wärme nur schlecht leiten. In der Stadt können demnach bei Energiezufuhr durch die übrigen Wärmehaushaltsgrößen größere Energiemengen per Bodenwärmestrom abgeleitet werden. Ebenso können aber Strahlungsverluste an der Oberfläche schnell wieder ausgeglichen werden (umgekehrter Bodenwärmestrom). Ihre typische Materialzusammensetzung lassen die Stadt wie einen Nachtspeicherofen wirken. Die Entstehung einer städtischen Wärmeinsel kann damit z.T. erklärt werden.

4. Strom latenter Wärme (V)

Auch diese Größe wird durch das Überwiegen kompakter Stoffe und die Baustruktur der Städte stark beeinflußt.

Wasserundurchlässige Oberflächen verhindern weitflächig das Eindringen des Niederschlags in den Boden. Niederschläge werden schnell gesammelt, größtenteils unterirdisch durch das *Kanalisationssystem* abgeleitet und so der Verdunstung entzogen. Die *Reduzierung vegetationsbedeckter Oberflächen* mindert das aus Transpirationsvorgängen stammende Wasserdampfangebot und wirkt damit in dieselbe Richtung. Kompensierend wirkt lediglich die Wasserdampffreisetzung aus anthropogen verursachten Verbrennungsvorgängen, wie sie in der Stadt in großer Zahl ablaufen. Insgesamt ist aber zu erwarten, daß der Strom latenter Wärme in der Stadt eine untergeordnete Rolle spielt, nach völligem Abtrocknen wasserundurchlässiger Oberflächen (Dächer, Straßen etc.) wird sogar V=O. Zwangsläufig müssen daher, z. B. bei stark positiver Strahlungsbilanz, größere Energiemengen über die verbleibenden Glieder der Energiebeilanz abgeführt werden. In erster Linie kommt hierfür der Bodenwärmestrom in Frage, der also nicht nur direkt durch die Wärmeleitungseigenschaften städtischen Baumaterials, sondern auch indirekt über das Wasserangebot modifiziert wird. Hierin kann eine weitere Ursache für die Entstehung der städtischen Wärmeinsel gesehen werden.

5. Strom fühlbarer Wärme (L)

Im o. g. Beispiel kann außer B vor allem L zum Ausgleich der Energiebilanz beitragen. Auch diese Größe wird durch die Beschaffenheit der in der Stadt überwiegenden Materialien und ihre typische Konfiguration beeinflußt. YAP und OKE (1974) haben in der ersten direkten Messung städtischer L–Werte sogar folgenden gravierenden Stadt–Freiland–Unterschied festgestellt: Während normalerweise, d. h. unter Freiland–Bedingungen, L tagsüber negativ (Oberfläche wärmer als Luft) und nachts positiv (Luft wärmer als Oberfläche) ist (mehrere Beispiele bei GEIGER 1961, S. 246 – 248), war in Vancouver im Juli ein Tag und Nacht negativer, von der Oberfläche weg gerichteter Strom fühlbarer Wärme zu beobachten.[9] Die Häusermasse gibt also während der ganzen Nacht noch Energie an die auflagernde Luft ab. Dies ist ein weiterer Beitrag zur Erklärung der städtischen Wärmeinsel.

Daß erst in allerjüngster Zeit Messungen von L vorliegen, ist nicht überraschend. L und V repräsentieren Wärmeströme, bei denen der Energietransport durch turbulenten Austausch erfolgt. Diesem ist, im Gegensatz etwa zum Transport durch Leitung bei B, meßtechnisch schwer beizukommen (MUNN 1966, S. 96: „... instrumental difficulties are formidable"). Man hat deshalb lange L und V nur indirekt über ihre Verknüpfung mit dem leichter meßbaren Q und B bestimmt (SVERDRUP–Verfahren):

$$L + V = -(Q+B) \qquad (7)$$

Wird diese umgewandelte Form von (1) –ohne Berücksichtigung von A– mit $\frac{L}{V}$ erweitert, ergeben sich

$$(8) \qquad L = -\frac{\frac{L}{V}(Q+B)}{1+\frac{L}{V}} \qquad \text{und} \qquad V = -\frac{Q+B}{1+\frac{L}{V}}$$

Der Quotient $\frac{L}{V}$, das sog. BOWEN–Verhältnis (BOWEN 1926), läßt sich unter der – eingeschränkt gültigen (vgl. MUNN 1966, S. 94/95)– Annahme gleicher Austauschkoeffizienten für fühlbare und latente Wärme aus den bodennahen vertikalen Gradienten der Temperatur und der spezifischen Feuchte bestimmen.

Unbefriedrigend an diesen Ansatz ist, daß auf diese Weise die Meßwerte der einzelnen Wärmehaushaltsgrößen nicht unabhängig voneinander sind. Vielmehr gehen alle Schwächen der Messung von Q und B auch bei L und V mit ein. Wenn man nun noch den kleinräumigen Wechsel der Oberflächen einer Stadt hinsichtlich Exposition und Materialbeschaffenheit bedenkt, findet das völlige Fehlen von Wärmehaushalts*messungen* in Stadtgebieten eine erste Erklärung: Auf kürzeste Entfernung sind hier ja z.B. α oder I (Schatten!) erheblichen und ϵ, und damit E, beachtenswerten Schwankungen unterworfen, so daß selbst der relativ einfach meßbare Faktor Q zum Problem wird. Dasselbe gilt angesichts der unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten auch für B. Man mißt also bestenfalls Werte, von denen man genaù weiß, daß sie nur für einen Bruchteil des betrachteten Areals repräsentativ sind.

Der Schönheitsfehler mangelhafter Repräsentativität könnte durch Mittelung der Werte verschiedener Meßpunkte etwas ausgeglichen werden. Aber die Komplexität der Stadtstruktur beeinträchtigt Wärmehaushaltsmessungen auch prinzipiell, da sie nicht mit der Forderung einer homogenen Meßpunktumgebung vereinbar ist. Dies ist aber unerläßliche Voraussetzung, wenn man, wie praktisch immer bei diesen Messungen, advektive Energietransporte außer Acht lassen will.

6. Anthropogene Wärmeproduktion (A)

In Stadtregionen kann diese Größe als Faktor des Wärmehaushalts nicht länger unberücksichtigt bleiben. Durch die hier im räumlicher Konzentration ablaufenden Prozesse der Verbrennung fossiler Brennstoffe für Elektrizitätsgewinnung, industrielle Produktion, Raumheizung und Kraftfahrzeug–Verkehr werden Energiemengen freigesetzt, die die Grössenordnung der Strahlungsbilanz erreichen oder übertreffen. Die bisher vorliegenden Abschätzungen wurden von FLOHN für den SMIC–Report gesammelt und kürzlich von OKE (1974, S. 35/36, Tab. 4) korrigiert und ergänzt (Tabelle 7).

Diese Daten zeigen – neben einer auf unterschiedliche Schätzmethoden zurückgehenden Unausgewogenheit – die im Vergleich zu Q große Bedeutung, die A insbesondere in Städten hoher Breiten und im Winter zukommt.

Dieser Stellung von A versucht die folgende Umformulierung der Energiebilanzgleichung (1) gerecht zu werden:

$$(9) \qquad Q + A = -(B+L+V)$$

Darin sind die vorwiegend Energie liefernden Wärmeströme den vorwiegend energieabführenden gegenübergestellt.

7. Advektive Energietransporte

wurden aus der Betrachtung bewußt ausgeklammert. Freilich verursacht auch dabei die Stadtstruktur charakteristische Abweichungen von den ‚normalen' Verhältnissen:
Die größere Rauhigkeit reduziert die Windgeschwindigkeiten, wenn diese allgemein hoch sind. Bei allgemein geringer Luftbewegung sind dagegen infolge stärkerer Turbulenz die Windgeschwindigkeiten in der Stadt eher größer als im Umland (CHANDLER 1965).

Tabelle 7: Anthropogene Wärmeproduktion A und mittlere Strahlungsbilanz $\bar{Q}$ für einige Städte

Quelle: SMIC—Report (1971), S. 58
OKE (1974), S. 35/36

Stadt	Fläche ϑ (km^2)		A ($W \cdot m^{-2}$)	$\bar{Q}$ ($W \cdot m^{-2}$)
Berlin, W.	234*		21	57
Budapest	113*	Jahr So/Wi	43 32/51	— —
Cincinnati	200*		26	—
Fairbanks	37*		19	18
Hamburg	747		13*	55
Los Angeles	3500*		21	108
Montreal	78*	Jahr So/Wi	99 57/153	— —
Moskau	878		127	42
New York (Manhatten)	59	So/Wi	40/198	93
Sheffield	48	Wi	19	56
Vancouver	112*	Jahr So/Wi	19 15/23	— —

* = nur bebautes Gebiet

Daten für größere Gebiete gibt FLOHN (1973), S. 21, Tab. 4

8. Zusammenfassung

Nach diesen Ausführungen soll in Tab. 8 versucht werden, die Modifikation des Wärmehaushalts durch den Einfluß der Stadt tabellarisch zusammenzufassen. Selbstverständlich sind außer den in der Tab. dargestellten Beziehungen auch alle Einzelfaktoren miteinander verknüpft (Gl. 1), so daß jede 'aktive' Veränderung einer Größe zur 'passiven' Anpassung der anderen führt. (Beispiel: Geringeres — V wegen wasserundurchlässigen Oberflächen führt zu größerem — L). Diese Wechselbeziehungen wurden wegen der praktisch unbegrenzten Interaktionsmöglichkeiten in Tab. 8 nicht dargestellt.

Alle Elemente des Wärmehaushalts werden also durch die charakteristischen Stadtmerkmale in mehr oder minder starker Weise gegenüber den Verhältnissen im Stadtumland modifiziert. Aus Tab. 8 wird deutlich, daß für jedes Wärmehaushaltselement aber mehrere Ursachen zur Ausbildung von Stadt—Umland—Differenzierungen führen können, die z. T. in unterschiedliche Richtung wirken. Wie sieht nun die Summe aller Modifikationen aus? Die oben in den Abschnitten 2 bis 7 angeführten Einzelergebnisse und Überlegungen sind, mangels verallgemeinerungsungähiger quantitativer Wärmehaushaltsbestimmungen in Städten, in Abb. 2 schematisch zusammengefaßt:
Im Normalfall, d. h. unter Freiland—Bedingungen, wird tagsüber der strahlungsbedingte Energiegewinn der Erdoberfläche (positives Q) durch turbulenten Transport fühlbarer (minus L) und latenter Wärme (minus V) in die Atmosphäre und durch Wärmeleitung in den Boden (minus B) ausgeglichen. Nachts wird der strahlungsbedingte Energieverlust (minus Q) durch Wärmeabgabe der Atmosphäre an den Boden (plus L), verminderte Verdunstung bzw. sogar Kondensation (minus V, plus V) und vor allem durch Wärmeleitung vom Boden zur Oberfläche (plus B) kompensiert. In der Stadt ist nun tagsüber der Gewinn aus Q geringer, dafür steht aber mit A ein weiterer Energielieferant zur Verfügung, der ganz-

Tabelle 8: Modifikation des Wärmehaushalts durch typische Stadtmerkmale.

Stadtmerkmale	verursachte Modifikation gegenüber dem Umland	primär betroffene Wärmehaushaltsgröße (bei Q auch Einzelkomponente d. Strahlungshaushalts)
Typ. Anordnung städt. Baustrukturen (Hochbauweise mit zahlr. vertikalen Flächen verschiedener Exposition; weitgehend versiegelter Untergrund)	— größere absorbierende und emittierende Fläche	Q
	— Mehrfachreflexionen solarer Strahlung	Q (I)
	— Beschattung	Q (I,H)
	— Wasserableitung über Kanalisation	V
	— Verminderung vegetationsbedeckter bzw. offener Flächen	V
	— größere Reibungswirkung — stärkere Turbulenz	Advektion, L,V
Eigenschaften der vorwiegenden Materialien (Ziegel, Beton, Asphalt, Kies etc., Metalle, Glas	— veränderte Reflexion solarer Strahlung	Q (I,H)
	— gering veränderte Emission	Q (E)
	— terrestrischer Strahlung	
	— größere Wärmeleitfähigkeit	B
	— größere Wärmekapazität	B
	— Wasserundurchlässigkeit	V
Verbrennungsvorgänge (Heizung, industrielle Prozesse, Verkehr, Stoffwechselfunktion)	— Freisetzung von Wärme	B, L
	— Freisetzung von Wasserdampf	
	— Freisetzung von luftverunr.Stoffen	
	— geringere Durchlässigkeit der Atmosphäre für solare Strahlung	Q (I,H)
	— stärkere atmosph.Absorption und — Emission langwelliger Strahlung	Q (E,G)

tägig — im Gegensatz zu B — [10] dieselbe Richtung zur Oberfläche aufweist und nachts verstärkt wirksam wird. Der Bodenwärmestrom ist in der Stadt von größerer Bedeutung: Tags wird mehr Energie in den Boden bzw. die Gebäude abgeleitet, nachts können entsprechend große Energiemengen an die Oberfläche zurückfließen. Die Verdunstung ist durch die versiegelten Oberflächen und die reduzierten Vegetationsbestände in ihrer Bedeutung insgesamt reduziert, der turbulente Transport fühlbarer Wärme (Konvektion) tagsüber entsprechend verstärkt und — wie die angeführten neueren Untersuchungen gezeigt haben —wegen des dauernden Energienachschubs durch A und B u. U. auch während der ganzen Nacht von der Oberfläche weg gerichtet. Unter der Bedingung vorangegangener Trockenheit ist, wie YAP und OKE (1974) zeigen, der Energieverlust durch L sogar stärker als der durch die Ausstrahlung.

Dieses qualitative Modell des städtischen Wärmehaushalts ist, wie oben bereits angedeutet, nur durch wenige, lediglich lokal gültige Messungen einzelner Elemente quantitativ abgesichert. Aus den Überlegungen ist auch deutlich geworden, daß die immense Variabilität der Oberflächeneigenschaften zu starker innerstädtischer Differenzierung der Wärmehaushaltselemente führt, die einer pauschalen Erfassung des städtischen Wärmehaushalts schwer überwindbare praktische und v. a. auch prinzipielle Hindernisse entgegenstellt. (Es sei noch-

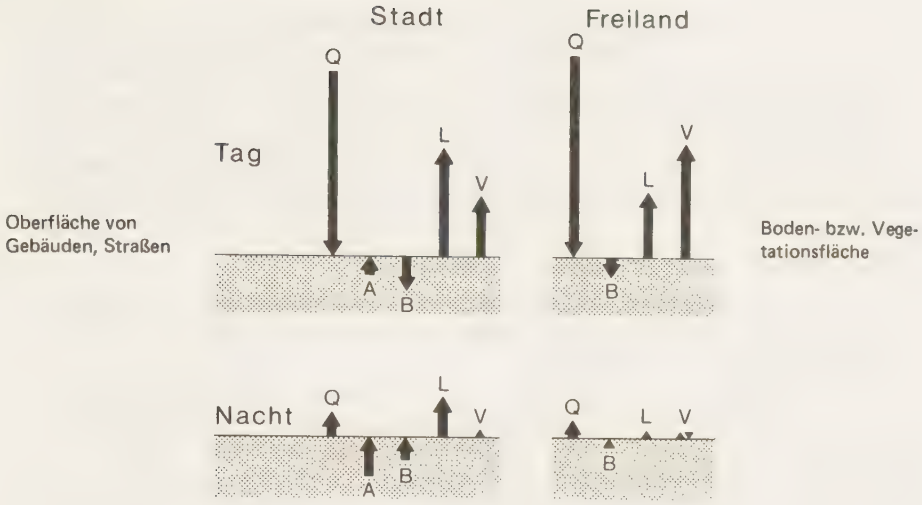


Abb. 2: Schematische Darstellung der Stadt—Freiland—Unterschiede der Wärmehaushaltsgrößen.

Die Pfeillänge repräsentiert unterschiedliche Größe der Energieströme (z. B. W/m^2) zur bzw. von der Grenzschicht weg. Art der Darstellung nach MUNN 1966, S. 4. Die Werte für Freiland basieren auf den Messungen von BAUMGARTNER in München (aus GEIGER 1961, S. 246), die für die Stadt auf denen von YAP und OKE 1974 (Figur 9 und 12) in Vancouver. Bei übernommenen Relationen der einzelnen Elemente untereinander wurde davon ausgegangen, daß Q im Freiland um 10 % höher ist. Werte für tags/nachts jeweils zum Zeitpunkt des Maximums/Minimums von Q. Gegenüber anderen Darstellungen (z. B. BORNSTEIN 1968, FUGGLE und OKE 1970) wird die Tag/Nacht-Relation korrekt wiedergegeben.

mals an die Schwierigkeit der direkten Bestimmung von L, V und A oder an die Rolle der Advektion erinnert). Es bleibt daher gerade in diesem Forschungsbereich ein sinnvolles Vorgehen, anstelle der Messung einzelner Wärmehaushaltsgrößen, die notwendigerweise fehlerbehaftet und von geringer Repräsentativität sein muß, zunächst die *klimatologische Auswirkung* zu untersuchen, die sich aus dem Nettoergebnis des Zusammenwirkens aller genannten Modifikationen ergibt. Als wichtigste Auswirkung dieser Art ist das als *städtische Wärmeinsel* [11] bekannte Phänomen anzusehen, also die Tatsache, daß sich städtische Agglomerationen durch eine positive Anomalie der Lufttemperatur auszeichnen. Die Faktoren, die zur Bildung der Wärmeinsel beitragen, wurden oben angeführt, die Isolierung und wertmäßige Erfassung des ursächlichen Anteils einzelner Wärmehaushaltsgrößen ist bislang allerdings nur bruchstückhaft möglich gewesen und wird aus den genannten Gründen auch weiterhin auf prinzipielle Schwierigkeiten stoßen. Es sind aber nicht nur die komplexen energetischen Zusammenhänge weitgehend unbekannt, sondern auch zahlreiche Details des städtisch beeinflußten Temperaturfeldes, wie z. B. die jahres— und tageszeitliche Veränderung der Wärmeinsel, ihre Verknüpfung mit bestimmten Baustrukturen oder ihre Beeinflussung durch Relief und Wind. Beim gegenwärtigen Forschungsstand ist deshalb eine Intensivierung der Kenntnisse über die Besonderheiten der Wärmeinsel ebenso notwendig wie eine Verbesserung der bisher auf wenig verallgemeinerungsfähige Einzelmessungen beschränkten Erfassung der zugrundeliegenden Energieumsetzungen.

— Im speziellen Fall von Freiburg liegen außer frühen Profilmessungen von LOSSNITZER und FREUDENBERG (1940) keine Untersuchungen des städtisch beeinflußten Temperaturfeldes vor.

C UNTERSUCHUNG DER WÄRMEINSEL DER STADT FREIBURG

1. Methodische Möglichkeiten der Erfassung des Stadteinflusses auf die Lufttemperatur

Die durch städtische Agglomerationen bedingten Modifikationen des bodennahen Temperaturfeldes können mit methodisch sehr unterschiedlichen Meßansätzen erfaßt werden, die mit jeweils typischen Vorteilen und Schwächen verbunden sind. Sie werden im folgenden kurz dargestellt.

1.1. Vergleich von Stadt– und Freilandstationen

Die naheliegendste Möglichkeit, das unterschiedliche thermische Verhalten von Städten und ihrem Umland festzustellen, ist die Analyse der an festinstallierten Stationen in bzw. außerhalb der Stadt gewonnenen Daten.

Sind Stationen in geeigneter Lage vorhanden – bei Großstädten mit außerhalb gelegenen Flugplätzen ist das z. B. in aller Regel der Fall –, dann können schon mit den Daten des regulären Stationsnetzes der Wetterdienste Stadt und Umland verglichen werden. An solchen Stationen werden über lange Zeiträume regelmäßige Terminablesungen vorgenommen, außerdem liegen kontinuierliche Registrierungen von Thermographen vor. Für einen Vergleich ergeben sich daraus zwei *Vorteile:* Erstens kann man sich auf langjährige, statistischer Behandlung zugängliche Beobachtungsreihen stützen und zweitens sind durch die kontinuerliche und synchrone Aufzeichnung insbesondere Aussagen über eine unterschiedliche zeitliche Temperatur*änderung* möglich.

Die Vergleichbarkeit der Beobachtungsreihen wird durch standardisierte Meßbedingungen (Wetterhütte über Rasenfläche) gewährleistet. Damit werden aber schon die *Nachteile* dieser Methode für differenzierte Aussagen sichtbar: Durch Inhomogenität der Oberflächen verursachte Temperaturänderungen werden bewußt soweit wie möglich ausgeschaltet. Entscheidender noch ist aber der Umstand, daß mit dieser Methode *keine* Aussagen über die *räumliche Differenzierung* der Temperaturverteilung gemacht werden können. Im einfachsten Fall wird eben nur ein Punkt der Stadt mit einem Punkt des Umlandes verglichen, wobei die Lage dieser Punkte zudem mehr von Zufälligkeiten als von sachlichen Erfordernissen bestimmt ist.

Auf diese Weise ist an vielen Beispielen (zusammengestellt bei KRATZER 1956, S. 54, PETERSON 1971, S. 36) gezeigt worden, daß Städte in den gemäßigten Breiten im Jahresmittel eine *positive Temperaturanomalie von 0.5 bis 1.5° C* gegenüber ihrem Umland aufweisen. Diese zunächst vielleicht gering erscheinende Differenz ist in ihrer Bedeutung besser einzuordnen, wenn man sich vergegenwärtigt, daß makroklimatisch so unterschiedlich situierte Orte wie z.B. Freiburg (10.2° C)[12] und Bremen (8.9° C)[12] im Jahresmittel auch nur um einen ähnlichen Betrag differieren. – Aus anderen Klimabereichen liegen nur wenige Untersuchungen vor. JAUREGUI (1973) berichtet, daß in Mexico–City das Jahresmittel in der Innenstadt um mehr als 2° C höher liegt als in den Außenbezirken (17° gegenüber 15°).

Die auf der Basis eines solchen Stationsvergleichs durchgeführte Analyse des Tagesgangs der Differenz zwischen Stadt und Freiland brachte im wesentlichen übereinstimmende Ergebnisse, die des Jahrgangs dagegen divergierende.

Im Mittel über einen längeren Zeitraum (1 Jahr) zeigt der *Tagesgang* der Differenz folgende charakteristischen Merkmale (KRATZER 1956, S. 61; ERIKSEN 1964, S. 71; PETERSON 1971, S. 134):

– Die größten Unterschiede (1.5 bis 3.0° C) treten in den frühen Nachtstunden (22 bis23 Uhr) auf. Im weiteren Verlauf der Nacht verringern sie sich etwas, bleiben aber bis zum Morgen noch relativ groß.

– Nach Sonnenaufgang vermindert sich die Differenz stark, da das Minimum in der Stadt mit zeitlicher Verzögerung eintritt.
– Allgemein geringe Differenzen kennzeichnen die Mittagsstunden (12 bis 15 Uhr). Oft weisen Freiland–Stationen während dieser Zeit sogar höhere Temperaturen als das Innere der Städte auf.

Keine allgemeinen Regeln lassen sich bisher für den *Jahresgang* der Temperaturdifferenz zwischen Stadt und Freiland angeben. Abb. 3 zeigt, daß die größte Differenz an verschiedenen Orten in ganz unterschiedlichen Jahreszeiten eintritt:

Abb. 3: Jahresgang der Differenz der Lufttemperatur zwischen Stadt und Freiland, $T_{St} - T_{Fr}$, für vier Städte (jeweils Montasmittelwerte mehrjähriger Reihen). Werte aus KRATZER 1956, S. 57 – 59.

Das Maximum der Temperaturdifferenz zwischen Stadt und Freiland tritt in München im August ein, in London im August und September, in Lyon im Dezember, in Wien dagegen im April. Ähnlich verschieden ist die Eintrittszeit der geringsten Differenz.

Diese Befunde werden an dieser Stelle lediglich referiert (vgl. Abschnitt C 4.1.). Es sei nur angemerkt, daß speziell die Uneinheitlichkeit der Ergebnisse über den Jahresgang die Begrenztheit des Vergleichs der Werte von fest installierten Klimastationen andeutet. Daß ausgerechnet das ozeanische London den größten, das kontinentale Wien den geringsten jährlichen Gang der Differenz aufweist, läßt vermuten, daß sich in diesen Ergebnissen weniger makroklimatische Lagefaktoren widerspiegeln, als vielmehr die von einer zur anderen Stadt nicht vergleichbare – und meist nicht näher spezifizierte – Lage der als repräsentativ für die Stadt bzw. das Freiland angesehenen Stationen (z.B. Stadtstationen in einem Park oder zwischen Hochhäusern, Freilandstationen im Luv oder im Lee der Stadt?).

1.2. Verdichtetes Stationsnetz

Ein besserer Überblick über die Besonderheiten des städtischen Temperaturmilieus ergibt sich, wenn man mehrere Temperaturmeßstationen gleichzeitig betreibt, sei es durch Verdichtung eines vorhandenen oder Anlage eines neuen Stationsnetzes. Freilich wird hier immer ein Kompromiß zwischen dem Ideal einer möglichst detaillierten Erfassung und den Erfordernissen der praktischen Realisierbarkeit nötig sein. Was als dichtes Netz von Meßstationen zu gelten hat wird immer von finanziellen und organisatorischen Möglichkeiten mitbestimmt. Sicher muß aber für ein einigermaßen differenziertes Bild der Temperatur-

verteilung in einem Stadtraum bei dieser Methode ein relativ hoher instrumenteller Aufwand betrieben werden. Die Untersuchungen, die sich lediglich auf ein Stationsnetz und nicht auf zusätzliche Meßfahrten stützen, bestätigen das, wie aus der folgenden Aufstellung hervorgeht (Tab. 9):

Tabelle 9: Anzahl der Meßstationen einiger stadtklimatischen Untersuchungen*

Bath / England	BALCHIN + PYE	(1947)	11 Thermometerstationen (1 x tägl. Ablesung) +2 Thermographen
(NE–) London	CHANDLER	(1961)	39 Thermometerstationen (2 x tägl. Ablesung)
Reading / England	PARRY	(1967)	10 Thermographen
Großraum Frankfurrt	RPU	(1970)	53 Thermographen

* Es sind nur solche Projekte genannt, bei denen ausschließlich mit festen Stationen gearbeitet wurde.

Besonders das Frankfurter Beispiel macht deutlich, daß bei dieser Methode die Möglichkeiten kleinerer Institutionen im Hinblick auf Geräteanschaffung, laufende Gerätewartung, Durchführung von Kontrollmessungen und Datenbearbeitung schnell überschritten werden.

Außer diesem mehr organisatorischen Problem ist noch ein prinzipieller Einwand gegen diese Methode vorzubringen: Selbst 10 und mehr Stationen – d. h. in Großstädten also 1 Station / 1 bis 4 km^2 – sind wenig angesichts der hier besonders vielfältigen Oberflächengestaltung. Gerade die Feinstruktur der Lufttemperaturverteilung, die durch den engräumigen Wechsel ganz verschiedener Bebauungs– bzw. Vegetationsbedeckungstypen beeinflußt wird, kann auf diese Weise nur unvollkommen erfaßt werden. Zwischen im Normalfall einige 100 m bis wenige km voneinander entfernt liegenden Meßpunkten kann nur interpoliert werden.[13] Genetisch interessant sind aber gerade die kleinräumigen Temperaturunterschiede, die sich als unmittelbare 'Reaktion' einstellen.

Dem großen Vorteil des Stationsnetzes, nämlich der synchronen und bei Einsatz von Thermographen auch kontinuierlichen Datenerfassung, stehen als Nachteil die unzureichende räumliche Kontinuität der Daten bei gleichzeitig hohem instrumentellem Aufwand gegenüber.

Es liegt nahe, auf synchrone Messungen an verschiedenen Punkten zugunsten einer größeren räumlichen Dichte der Meßpunkte zu verzichten, zumal man auf diese Weise auch mit weniger Instrumenten auskommt. Dieser Grundgedanke führt zur dritten stadtklimatologischen Meßmethode:

1.3. Meßfahrten

Darunter ist eine Untersuchungstechnik zu verstehen, bei der ein Fahrzeug als Geräteträger verwendet wird, um klimatologische Parameter in kurzem zeitlichem Abstand an einer grossen Zahl von dicht aufeinander folgenden Punkten zu messen. Prinzipiell entsteht das Problem, daß an verschiedenen Orten auch zu verschiedener Zeit gemessen wird, das räumliche Verteilungsbild einer klimatologischen Größe für einen bestimmten Zeitpunkt also auf Daten aufbaut, die nicht synchron ermittelt wurden. Aber bei Anwendung geeigneter Reduktionsverfahren können die Messungen als quasi–synchron angesehen und einem bestimmten Zeitpunkt zugeordnet werden, so daß sich bei günstiger Routenwahl ein flächenhaftes Zustandsbild der gemessenen Parameter ergibt.

1.3.1. Anfänge der Meßfahrttechnik: In ihrer einfachsten Form ist diese Methode so alt wi die systematische Erforschung des Sonderklimas der Städte überhaupt.

Als erster hat SCHMIDT (1927) in Wien mobile Messungen zur Verteilung der Minimumtemperaturen in einer Frostnacht durchgeführt. Danach griff A. PEPPLER (1929, S. 59) die Methode auf:

„Um die meteorologischen Verhältnisse der bodennahen Luftschicht rasch und bequem über große Flächen festzustellen, ist der Kraftwagen das gegebene Forschungsmittel."

Seine Untersuchung kann als Beispiel für die frühen Meßfahrten gelten: An einem Hochsommertag mit antizyklonaler Witterung fuhr er mittags und abends je zweimal auf einer N – S und einer W – E verlaufenden Strecke quer durch Karlsruhe und nahm dabei an 45 festgelegten Punkten Ablesungen am Aßmann'schen Aspirationspsychrometer vor. Daraus ergeben sich Temperaturprofile durch die Stadt, die auch zu einer Isothermenkarte zusammengefaßt sind. – Die Untersuchung PEPPLERs macht auch exemplarisch die Schwächen deutlich, die in der Anfangszeit mit mobilen Messungen verknüpft waren: Die lange Einstellzeit der im Aßmann–Gerät eingebauten Quecksilberthermometer läßt Ablesungen während der Fahrt eigentlich nicht zu. Soll der Ortsfehler nicht unerträglich groß werden, muß zumindest sehr langsam gefahren bzw. an den Meßpunkten angehalten werden. Das wiederum limitiert den Aktionsradius, weil bei zu langen Meßzeiten (> 2h) der Einfluß des Tagesganges nicht mehr sinnvoll korrigiert werden kann. Ist die zu erfassende Fläche groß (Großstadt), muß die Datenbasis deshalb vergleichsweise schmal bleiben. Tatsächlich ist auch die Konstruktion der Isothermen bei PEPPLER (1929, Abb. 2) mehr als großzügig: Sie stützt sich lediglich auf die beiden aufeinander senkrecht stehenden Profillinien und ist ansonsten offensichtlich per Analogieschluß dem Gelände angepaßt.

Auf ähnliche Weise arbeiteten dann STEINHAUSER (1932) in Wien, BÜDEL und WOLF (1933) in München, BERG und MEZLER (1935) in Hannover und LESSMANN u. ZEDLER (1936) in Berlin.[14] Alle diese frühen Arbeiten sind dadurch gekennzeichnet, daß mit einer neuen Untersuchungstechnik aber nicht optimal darauf abgestimmten Meßinstrumenten – nämlich Flüssigkeitsthermometern – eher stichprobenartig (jeweils nur wenige Meßfahrter die aus 'klassischen' Stationsvergleichen bekannte Tatsache des Wärmeüberschusses der Innenstädte bestätigt wurde. Die genaue flächenhafte Aufnahme der Temperaturverteilung, aus der die innerstädtische Differenzierung oder gar der Bezug zur Baukörperstruktur hervorgeht, war noch nicht möglich.

1.3.2. Instrumentelle Verbesserungen: Richtig eingesetzt, liefert das Aßmann–Gerät sehr gute Werte, wenn auch die genaue Ablesung v.a. bei Nacht recht problematisch ist. Wegen der notwendigen Zwischenstops und der umständlichen Handhabung ist es aber nicht geeignet, um in der gebotenen Kürze (– quasi–synchrone Aufnahme!) eine längere Meßstrecke abzufahren. Das ist aber unerläßlich, weil für echte Flächendeckung die Fahrtroute die Stadt netzartig abdecken und nicht nur querschneiden sollte. Am sinnvollsten läßt sich dieses Problem durch *kontinuierliche Messung* während der Fahrt und selbsttätige *Datenaufzeichnung lösen.*

Als erste haben LOSSNITZER und FREUDENBERG (1940) einen Flugzeug*meteorographe* bei Meßfahrten mit einem Motorrad mit Beiwagen eingesetzt, allerdings nur auf einer reinen Querprofilstrecke. Für lange Zeit, zuletzt bei ERIKSEN (1964) in Kiel, blieben solche Druc Temperatur und Feuchte aufzeichnenden *Trommelschreiber* stadtklimatologische Standard geräte. Problematisch war dabei weniger die eigentliche Meßgenauigkeit bzw. Ansprechzeit als vielmehr die Erschütterungsempfindlichkeit. EMONDS (1954) und ERIKSEN verwendeten selbstkonstruierte stoßdämpfende Halterungen, während LOSSNITZER und FREUDEN BERG (1940, S. 30) zu dem Schluß kamen, daß „alle elastischen Aufhängevorrichtungen de abfedernden Wirkung des menschlichen Körpers bei weitem nachstehen" und deshalb das Gerät vom Beifahrer halten ließen – sicherlich keine optimale Lösung.

Tabelle 10: Meßfahrten im Rahmen der Stadtklimatologie, technische Daten der neueren Untersuchungen.

Autor	Ort der Untersuchung	Zahl der Meß-fahrten	Zeitraum der Durchführung (Monat/Jahr)	Dauer einer Meßfahrt Fahrgeschw. (km/h)	Meßgerät bzw. elektr. Meßelement (nähere Angaben zur Konstruktion)
SUNDBORG (1951)	Uppsala	?	1 - 8/1948	90 Min. 40 - 60	Widerstandsthermometer (Eigenkonstr.: Pt-Draht in Spiralrohr)
DUCKWORTH u. SANDBERG (1954)	San Francisco, Palo Alto	35	7/1951-6/1952	60 Min. ** 30 - 35	Thermistor (?)
EMONDS (1954)	Bonn	34	7/1951-8/1952	? ?	Flugzeugmeteorograph
CHANDLER (1962)	London	mehrere	10/58-11/1960	? ?	Widerstandsthermometer (?)
ERIKSEN (1964)	Kiel	mehrere	7-12/1961	90 - 120 Min. 30	Flugzeugmeteorograph
CHANDLER (1965)	London	mehrere	ab 6/1962 - ?	? ca. 32	Widerstandsthermometer (?)
LINDQVIST (1968)	Lund	8	22. 3. 1965 (alle 3 Std.)	? ?	Thermistor (?)
HAMM (1969)	Stuttgart	ca. 10	8/1965-1/1966	150-180 Min. 30 - 40	Widerstandsthermometer (Eigenkonstr.: ?)
SCHULZE (1969)	Berlin	14*	10/67-3/1968	4 Stunden 35 - 38	Widerstandsthermometer (Eigenkonstr.: Pt-Draht auf Glimmer)
LUDWIG (1970)	Dallas, Fort Worth	?	Sommer 1967	? ?	Thermistor (?)
TERJUNG (1970)	Los Angeles	1	24. 5. 68, 14 h	75 Min. ?	"elektron. Thermometer" (?)
OKE u. EAST (1971)	Montreal	48	2/1968-3/1970	120 Min. ?	Thermistor (?)
OKE u. FUGGLE (1972)	Montreal	12	8/1969-7/1970	90 Min 50	Thermistor (?)
SHARON u. KOPLOWITZ (1972)	Ashdod, Isr.	4	4/1970	? 30	Thermistor (?)
ZACHARIAS (1972)	Berlin	1	15./16. 6. 1966	4 Stunden 40	Widerstandsthermometer (Eigenkonst.: Pt-Draht auf Glimmer)
vorl. Unters.	Freiburg	108	10/71-11/1973	60– 120 Min. 30 - 35	Widerstandsthermometer (Eigenkonstr. unter Verwendung von Meßwiderständen Pt-100 nach DIN 43760)

* 14 verschiedene Routen, zu Gesamtkarte kombiniert
** Gleichzeitiger Einsatz von 3 Meßfahrzeugen

Meßhöhe üb. Grund (m)	Trocken-temp. (t), Feucht-temp. (f), ventiliert(v)	Anzeige-/Regiestriergerät	Angaben zur - Genauigkeit	Angaben zur Trägheit
1.5	t	Galvanometer, Ablesung an festgel. Punkten	0.2°C	–
2.0	t, v	Meßbrücke, Ablesung an festgel. Punkten	–	–
?	t, f	(Trommelschreiber kombiniert mit Meßgerät)	–	–
1.2	t, f	Galvanometer	–	90%-Zeit 18 sec (trocken)
0.9	t, f	(Trommelschreiber kombiniert mit Meßgerät)	± 0.2°C Abweichg. gegen Aßmann	–
1.2	t, f	2-Punkt-Schreiber 'Dynamaster', Punktfolge 4,6 sec	–	90%-Zeit 5 sec (trocken)
?	t	Meßbrücke	–	–
1.0	t, f	Kreuzspulohmmeter (Hartmann & Braun)	± 0.2°C Abweichg. gegen Aßmann	–
0.2 / 2.0	t, v	Kompensations-12-Punktschreiber 'Polycomp' (H&B), Punktfolge 8 sec	–	50%-Zeit 3.5 sec 90%-Zeit 10 sec
0.3 / 2.0	t, f, v	?	trocken 0.25°C feucht 0.5°C	'response time' 10 sec (trocken) 30 sec (feucht)
2.0	t, f	(Ablesung an 111 Einzelpunkten)	–	
1.5	t, v	('kontinuierliche Aufzeichnung')	rel. 0.2°C absol. 0.5°C	'response time' 0.5 sec
1.5	t, v	Punktschreiber 'Electronik 194' (Honeywell), Punktfolge 0.25 sec	rel. 0.2°C absol. 0.5°C	'response time' 0.5 sec
0.5 / 2.0	t	Flachbahnschreiber 'Rustrac'	–	–
0.2 / 2.0	t, v	Kompensations-12-Punktschreiber 'Polycomp' (H&B), Punktfolge 8 sec	–	50%-Zeit 3.5 sec 90%-Zeit 10 sec
0.7 / 2.0	t, f, v	Kompensations-12-Punktschreiber 'Polycomp 2' (Hartmann & Braun) Punktfolge 2 sec	rel. 0.1°C absol. 0.5°C	50%-Zeit 8 sec 90%-Zeit 22.5 sec

Erst die Entwicklung der Meß– und Registriertecchnik in den letzten Jahren löst dieses Problem und markiert damit ein neues Stadium der Meßfahrttechnik.[15] Es ist gekennzeichnet durch *elektrische Meßelemente* und die damit möglich gewordene *Trennung von Meß- und Registriergerät.* Auf diese Weise kann man weitgehend verzögerungsfrei und kontinuierlich messen und absolut erschütterungsfrei aufzeichnen.

Heute gibt es eine große Fülle möglicher Geräteanordnungen, deren Leistungsfähigkeit allerdings sehr unterschiedlich ist. Leider sind die Angaben vieler Autoren über Art und Genauigkeit der jeweils benutzten Apparatur sehr lückenhaft. Aber gerade in diesem Bereich klimatologischer Forschung, der keine standardisierten Geräte oder durch Vereinbarung gesicherte Meßvorschriften kennt, ist eine ausreichende Information über das Instrumentarium notwendig. Für einige jüngere Untersuchungen habe ich deshalb zusammengestellt, was den Veröffentlichungen an Angaben über Beschaffenheit und Genauigkeit der Meßapparatur sowie über Anlage der Routen, Zeitpunkt, Dauer und Anzahl der Meßfahrten und die Art der Darstellung der Ergebnisse zu entnehmen ist. Diese Angaben sind in Tab. 10 aufgeführt und werden im Vergleich mit der für die vorliegende Untersuchung verwendeten Apparatur diskutiert (Abschnitt 2.2.1.).

1.4. Vertikale Meßprofile

Der Vollständigkeit wegen ist hier noch eine vierte stadtklimatologische Untersuchungsmethode zu erwähnen, deren optimale Ausprägung (mobile Messung) wegen des hohen instrumentellen Aufwandes bisher eine Domäne amerikanischer Forschungsgruppen zu sein scheint: Die Einbeziehung der dritten Dimension in stadtklimatologische Meßprogramme.

Als Möglichkeiten zur Ermittlung vertikaler Meßprofile kommen in Frage:

– An hohen Türmen fest installierte Meßelemente. Eine behelfsmäßige Lösung, die bei günstig situierten Bauten Stadt–Umland–Vergleiche entsprechend dem bodennahen Stationsvergleich (1.1.) ermöglicht. MACHALEK (1974) vergleicht so das Profil am Stephansdom und dem stadtrandnah gelegenen neuen Fernsehturm in Wien.

– Radiosonden. Ihr Einsatz ist für stadtklimatische Forschungen zu wenig flexibel: Es lassen sich mit relativ großem Aufwand immer nor wenige Profile vermessen, die zwar sehr hoch reichen, dafür aber in den bodennahen Schichten der Atmosphäre nur wenige Meßwerte liefern. Wichtig sind aber Profile von möglichst vielen verschiedenen Punkten der Stadt aus, wobei weniger eine große Aufstiegshöhe als vielmehr eine gute Auflösung in den untersten x 100 m wichtig ist. Fesselballons, die dafür geeignet wären, sind über Stadtgebieten meist nicht einsetzbar. Bei den Untersuchungen von DUCKWORTH u. SANDBERG (1954), GUTSCHE (1958), RPU (1970 f.) und DWD (1972) wurden für die Untersuchung der Vertikalstruktur des Temperaturfeldes Radiosonden eingesetzt.

– Hubschrauber als Geräteträger. Sie ermöglichen eine dem Meßfahrt–Prinzip am Boden ähnliche Untersuchungstechnik mit schnell nacheinander an verschiedenen Punkten der Stadt aufgenommenen Vertikalprofilen. BORNSTEIN (1968) in New York, CLARKE (1969) in Cincinnati und OKE u. EAST (1970) in Montreal konnten auf diese Weise zusammen mit Bodenmessungen das räumliche Verteilungsbild der Lufttemperatur beschreiben.

2. Verwendete Meßmethodik

Die oben (Abschnitt C 1.) getroffenen Feststellungen deuten schon die methodische Richtung an, die bei der vorliegenden Untersuchung in Freiburg eingeschlagen wurde. Sie wird im folgenden vorgestellt, mit ihren Vor– und Nachteilen erläutert und mit bei anderen jüngeren Untersuchungen verwendeten Methoden verglichen.

2.1. Ortsfestes Stationsnetz

Im Stadtgebiet Freiburgs wurden 5 mit Thermohygrographen der Fa. Lambrecht, Göttingen, ausgerüsteten Klimastationen eingerichtet, so daß zusammen mit der beim Wetteramt betriebenen insgesamt 6 Stationen zur Verfügung standen. Über Details der Lage und Ausstattung geben Tab. 11 und Karte 1 Auskunft (vgl. Abschnitt 2.2.2.).

Tabelle 11: Lage und Umgebung der Thermohygrographen—Stationen.

Bezeichnung in Karte 1	Kurzbezeichn.	Lage	Umgebung (50 m ϕ)	Höhe des Geländes über NN	Typ der Wetterhütte (Aufstellung jew. 2 , über Grund)
E	Betzenhausen	50 m südl. Gasbehälter der GVS („Gaskugel")an der Dietenbachstr./ Betzenhausen	eben, Rasen	236 m	Engl. Hütte
F	Haid	200 m südsüdwest des Omnibusdepots der Städt. Verkehrs AG an der Betzenhauser—Str.	eben, Rasen, Brachland	238 m	Gießener Hütte
A	Rathaus	Innenhof des Rathauses zw. Gauch— u. Turmstr. bei der sog. „Gerichtslaube"	eben, Rasen, Gebüsch, Ruine in 10 m Abst.	275 m	Engl. Hütte
B	Wetteramt	Stefan—Meier—Str. 4	eben, Rasen, Gebüsch, Straße	269 m	Engl. Hütte
D	Mez	Südexponierter Hang des Schloßbergs, Gelände der Fa. Mez an der Kartäuserstraße, 30 m über dem Straßenniveau	sehr steiler Hang (40°), Weinberg	310 m	Gießener Hütte
C	Gärtnerei	Gelände der ehem. Stadtgärtnerei an der Schwarzwaldstr. Höhe Meßplatz	eben, Rasen, Gartengelände	294 m	Engl. Hütte

Mit den dauernd registrierenden Meßstellen sollte eine Dokumentationsbasis für die zwar detaillierten, aber kurzfristigen Meßfahrten geschaffen werden. Außerdem sollten sie Aufschluß über die Unterschiede des Temperaturganges innerhalb und außerhalb der Stadt bzw. in unterschiedlich gestalteter städtischer Umgebung geben. Die zur Verfügung stehenden Geräte wurden deshalb so postiert, daß Innenstadt (A,B), östliche (C,D) und westliche (E,F)

Vorstadt mit je 2 Stationen vertreten sind, wobei sich E am Bebauungsrand, D und F in agrarisch genutztem Gelände außerhalb der bebauten Gebiete befinden (Sonderstellung von D durch Hanglage). Bei dieser Anordnung wurde auch berücksichtigt, daß topographische Situationen und vorhergehende Untersuchungen in Freiburg eine W—E Abstufung der klimatischen Verhältnisse erwarten lassen, weil die markanteste Landschaftsgrenze zwischen Schwarzwald und oberrheinischem Tiefland hier annähernd SW — NE verläuft. Natürlich wird die Standortwahl etwas eingeengt, weil nicht überall geeignete Grundstücke zur Aufstellung der Geräte zur Verfügung stehen. Sie sollten möglichst jederzeit erreichbar, aber wegen der Gefahr mutwilliger Beschädigung [16] nicht öffentlich zugänglich sein. Mit Ausnahme von D (Privatgelände der Fa. Mez) stehen die Freiburger Stationen deshalb auf Grundstücken verschiedener städtischer Einrichtungen (Betriebshof der Verkehrs AG, Gasbehälter der städtischen Gasversorgung, Stadtgärtnerei). Diese Anordnung hat sich bewährt.

Die Registrierstreifen der Thermohygrographen wurden wöchentlich gewechselt, dabei wurden Kontrollmessungen mit dem Aßmann'schen Aspirationspsychrometer vorgenommen. Das Meßnetz wurde in dieser Form 1971 eingerichtet. Aus personellen Gründen war eine ununterbrochene Betreuung aber erst ab 1972 sichergestellt. Für die Behandlung in Abschnitt 4.1. wird Material von 1971 und 1972 herangezogen.

2.2. Meßfahrten

Im Gegensatz zu mehreren älteren Untersuchungen, bei denen Meßfahrten mehr ergänzend zu klassischen Methoden verwendet wurden, nehmen sie bei der vorliegenden Arbeit die zentrale Stellung ein. Die zugrunde liegende Methodik soll deshalb etwas ausführlicher erläutert werden.

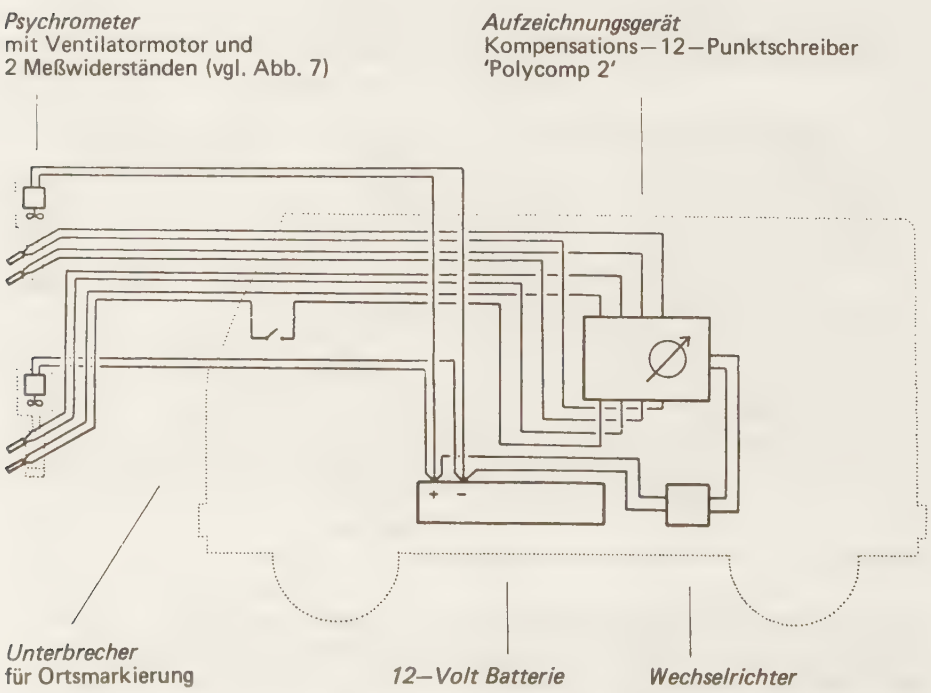


Abb. 4: Aufbau und Schaltplan der Meßapparatur, schematisch.

2.2.1. Meßapparatur

Aufbau: Der Aufbau der verwendeten Meßapparatur geht aus dem Schema in Abb. 4 und den Abb. 5 und 6 hervor: Als *Geräteträger* diente der VW–Bus des Geographischen Instituts I der Universität Freiburg. Außer einer an Wagenboden und Dachrinne fixierten Halterung für das in Abb. 5 sichtbare Stahlrohrgestell waren keine weiteren Veränderungen

Abb. 5:

Anbringung der Psychrometer am Meßfahrzeug

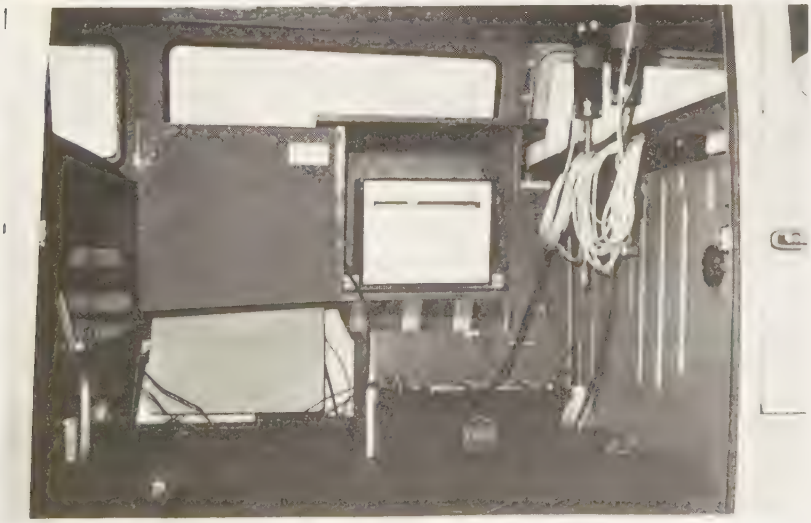


Abb. 6: Anordnung der Geräte im Meßfahrzeug.

Das Aufzeichnungsgerät ist zur stationären Verwendung im Gelände in einer Hütte untergebracht. Vorn links der Wechselrichter, dahinter verdeckt ein Batterieladegerät.

notwendig. Das Gestell ermöglicht die unterschiedlich hohe Anbringung der Psychrometer in 80 cm Entfernung vor der Wagenfront, die sich bei BJELANOVIC (1967) u. AICHELE (1968) bewährt hat. Zusammen mit dem im Heck eingebauten Motor, weißer Wagenfarbe und einer geeigneten Konstruktion der Psychrometer (siehe unten) gewährleistet diese Anordnung größtmögliche Sicherheit gegen eine Beeinflussung der Messungen durch die Eigenstrahlung des Fahrzeugs. Entsprechende Kontrollmessungen (Vergleich mit Aßmann—Werten) wurden bei verschiedenen Geschwindigkeiten auf einer Teststrecke im Mooswald durchgeführt.

An dem schon genannten Stahlrohrgestell sind die beiden eigentlichen *Meßgeräte* in 0.7 bzw. 2.0 m Höhe angebracht. Es handelt sich dabei um dem im Deutschen Wetterdienst eingeführten FRANKENBERGER—Gerät ähnliche, mit Widerstandsthermometern ausgerüstete elektrische Psychrometer.*

Abb. 7 zeigt eines dieser Psychrometer: In einem Kunstharzblock sind Halterungen für zwei Meßelemente eingelassen, die jeweils durch doppelte polierte Metallhülsen gegen direk-

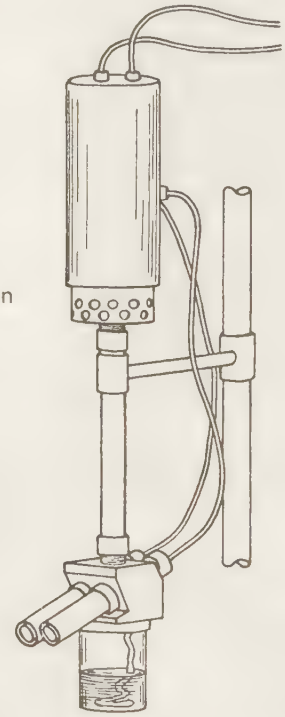


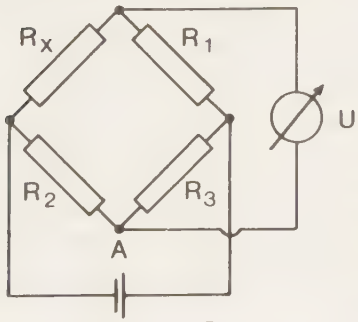
Abb. 7: Am Meßwagen installiertes Psychrometer (Orginalgröße 52 cm). Die Meßwiderstände für Trocken— und Feuchttemperatur sind in den beiden nach schräg unten weisenden Luftführungsrohren untergebracht.

* Sie wurden in Einzelanfertigung in der Werkstatt des Meteorologischen Instituts der Universität Freiburg von Herrn Mechanikermeister H. TRICK hergestellt. In Zusammenarbeit mit Herrn U. KAMPLADE vom Geographischen Institut I hat er auch die ganze übrige Installation der Anlage und später die zahlreichen Nachbesserungen, Korrekturen und Reparaturen zuverlässig ausgeführt. Dem Leiter des Instituts, Herrn Prof. Dr. A. KESSLER und Herrn TRICK danke ich sehr für die jederzeit gewährte Unterstützung.

te Strahlung geschützt sind. Durch diese Hülsen und das vertikale Rohr wird von einem kleinen, mit einem Gleichstrommotor (Fa. Dunker) angetriebenen *Ventilator* Luft angesaugt, die durch das gelochte Blech am unteren Rand des Ventilatorgehäuses wieder austritt. Eines der beiden Meßelemente wird durch einen Baumwolldocht feucht gehalten. Der Docht führt aus dem Wasservorratsbehälter am unteren Ende von hinten, also entgegen der Luftansaugrichtung, zum Meßelement; es wird also nicht schon 'vorgefeuchtete' Luft gemessen.

Als Meßelemente dienen *Platin–Hartglas–Widerstände* der Bauart Pt 100 nach DIN 43760 (Typ G 2025 der Fa. Heraeus, Hanau), d. h. 35 mm lange Glaszylinder von 2.5 mm Durchmesser, in die ein feiner, gewendelter Pt–Draht eingeschmolzen ist, der bei 0° C einen Nennwiderstand von 100 Ω ausübt. Der Ohm'sche Widerstand nimmt mit zunehmender Temperatur nahezu linear zu und kann somit – genügend empfindliche Widerstandsbestimmung mit geeigneten elektrischen Schaltungen vorausgesetzt – zur Temperaturmessung herangezogen werden (Prinzip des *Widerstandsthermometers*). Nach Angaben des Herstellers beträgt der Selbsterwärmungsfehler der verwendeten Meßwiderstände bei bewegter Luft 0.07^{o} C/mW, die Halbwertzeit (d. h. die Zeit, die das Termometer benötigt um die Hälfte eines Temperatursprungs zu erfassen) 8.0 sec, die 9/10–Zeit 22.5 sec. (Auf diese Werte wird weiter unten noch eingegangen).

Die Aufgabe, die sich mit der Temperatur ändernden Widerstände aller 4 Meßstellen zu messen und nach Meßstellen identifizierbar als Temperaturwerte zu registrieren, übernimmt ein elektronisch gesteuerter *Kompensations–12 Punktschreiber* (Polycomp 2 der Fa. Hartmann & Braun, Frankfurt). Das Gerät arbeitet dabei nach dem Prinzip der Wheatstone–Brücke im Kompensationsverfahren als Nullmeßgerät:



Dann gilt $\frac{R_x}{R_1} = \frac{R_2}{R_3}$,

Dieses Meßprinzip läßt sich folgendermaßen veranschaulichen: Mit der Balkenwaage mißt man ein unbekanntes Gewicht, indem man es durch bekannte Gewichte kompensiert und damit die Anzeige auf Null einstellt. Analog dazu wird bei der Wheatstone–Brücke ein unbekannter Widerstand R_x bestimmt, indem er durch ein in bekannter Weise veränderbares Verhältnis der Widerstände R_2/R_3 so kompensiert wird, daß die Spannung U = O ist.
woraus sich R_x bestimmen läßt.

Das geschieht einfach dadurch, daß R_2 und R_3 von einem Potentiometer gebildet werden, dessen Schleifer den Punkt A darstellt. Wird das Potentiometer auf U = O eingestellt, ist die Schleiferstellung, die auf eine in ^{o}C geeichte Skala übertragen werden kann, ein unmittelbares Maß für R_x. Die bei sich ändernden R_x für U = O notwendige Änderung der Schleiferstellung wird beim Polycomp durch eine Regeleinrichtung mit Servomotor automatisch nachgestellt („selbstabgleichend"). Der Temperatureinfluß auf die langen Zuleitungen zu R_x, der meßwertverfälschend wirken würde, wird durch eine Dreileiterschaltung ausgeglichen.

Der Polycomp kann *12* verschiedene *Meßstellen* verarbeiten, die nacheinander im Abstand von *2 sec* abgerufen und deren Werte durch ein Druckwerk in Symbolen von unterschiedlicher Form bzw. Farbe aufgezeichnet werden. Da im vorliegenden Fall nur 4 Meßstellen benötigt werden (trockenes und feuchtes Meßelement jeweils oben und unten), konnten jeweils 3 Anschlüsse mit derselben Meßstelle verbunden werden (Punkte 1, 5, 9 an Meßstelle I; Punkte 2, 6, 10 an Meßstelle II usw.), so daß dieselbe Meßstelle jeweils nach 8 sec wieder abgerufen wird. Die auf dem Diagrammpapier aufgezeichneten Temperaturkurven

der einzelnen Meßstellen setzen sich also aus im Abstand von 8 sec vorgenommenen Einzelmessungen zusammen. Der *Papiervorschub* ist mit 1 cm/min genügend groß,[17] um auch bei starken Temperaturschwankungen eine übersichtliche Aufzeichnung zu gewährleisten.

Die gesamte Anlage wird von einer 12 V 110 Ah – *Batterie* mit Strom versorgt, der zum Betrieb des Polycomp in einem *Wechselrichter* in 220 V Wechselstrom umgeformt wird.

Diskussion: Wo liegen nun *Vor– oder Nachteile* dieser Meßapparatur im Vergleich zu den von anderen Autoren benutzten Geräten?

Die Vorteile des VW–Bus als *Geräteträger* gegenüber Fahrrad (noch EMONDS 1954), Motorrad (LOSSNITZER u. FREUDENBERG 1940) etc. sind selbstverständlich. Gegenüber den sonst meist verwendeten PKW ist der größte Vorteil weniger die problemlose Unterbringung der Anzeigegeräte als vielmehr die durch die senkrechte Wagenstirnseite erleichterte Anbringung der Meßfühler vor dem Fahrzeug. Das ist aber insbesondere bei gleichzeitiger Messung in verschiedenen Niveaus unerläßlich, da nur so verhindert werden kann, daß die vom Fahrzeug hervorgerufene turbulente Durchmischung die Messung verfälscht. Die Anlage von SCHULZE (1969) bzw. ZACHARIAS (1972) z. B. erfüllt diese Forderung nicht: Ein Meßfühler ist hier unter der Stoßstange des Fahrzeugs, der andere in Wagenmitte über dem Dach angebracht.

Durch die Möglichkeit der räumlichen Trennung von Meßwertgeber und Meßwertanzeige sind die prinzipiellen Vorteile *elektrischer Meßmetnoden* – etwa verglichen mit den früher verwendeten Flugzeugmeteorographen – ebenso offensichtlich. Allerdings erfordern die einzelnen Bestandteile eine gesonderte Betrachtung.

Zunächst zum Anzeigegerät: Mehrfach wurden bei elektrischen Messungen zur Anzeige Galvanometer und ähnliche Zeigerinstrumente verwendet (SUNDBORG 1951, CHANDLER 1962, HAMM 1969). Bei Meßfahrten müssen dabei während der Fahrt Ablesungen vorgenommen und zusammen mit dem Standort protokolliert werden. Das führt zwangsläufig zu relativ weit voneinander entfernten Meßpunkten. Demgegenüber zeichnen automatisch kontinuierlich registrierende Anzeigegeräte wie der Polycomp unmittelbar ein Meßwertprofil entlang der befahrenen Strecke auf und schließen außerdem etwaige Ablese– oder Protokollfehler aus. Unter den selbsttätig registrierenden Geräten empfehlen sich Kompensations–Punktschreiber durch das Meßprinzip (s. o. S. 29) und vor allem – etwa gegenüber Fallbügelschreibern oder Zeigerinstrumenten – durch ihre Robustheit und Unempfindlichkeit gegenüber Schüttelbewegungen wie sie bei Meßfahrten unvermeidlich sind. Ihr einziger Nachteil ist der relativ hohe Anschaffungspreis.

Eine kleine Besonderheit der hier beschriebenen Anlage hat sich in der Praxis der Meßfahrten als außerordentlich hilfreich erwiesen: Auch bei automatischer Registrierung kann auf ein zusätzliches Standortprotokoll nicht verzichtet werden, da eine nachträgliche Zuordnung von Meßwert und Meßort sonst nicht möglich ist. Zu Beginn der Untersuchung war deshalb ein Helfer notwendig, der auf dem abrollenden Diagrammpapier Markierungen anbrachte und ein entsprechendes Ortsprotokoll führte – ein relativ umständliches und für den Betroffenen in Anbetracht der oft außergewöhnlichen Meßzeiten (nachts bzw. vor Sonnenaufgang) auch unerfreuliches Verfahren. Ein einfacher, am Armaturenbrett angebrachter Schalter, mit dem der Stromkreis einer der Meßstellen kurzfristig unterbrochen werden kann (vgl. Abb. 4), machte den Helfer entbehrlich. Wird die unterbrochene Meßstelle abgerufen geht die Anzeige unter die Grenze des Meßbereichsumfanges zurück, d. h. der entsprechende Punkt wird an den linken Rand des Diagrammpapiers gesetzt. Gleichzeitig mit dem Setzen dieser Markierung wird – ebenfalls vom Fahrer – eine Notiz über Standort und Uhrzeit auf Tonband gesprochen. Anhand des Aufdrucks auf dem Diagrammpapier (1 Querstrich/cm $\hat{=}$ 1 min) und der Tonbandaufzeichnung können die Zeitmarken nach Beendigung der Fahrt wieder eindeutig indentifiziert und mit der jeweiligen Standortbezeichnung versehen werden. Dieses Verfahren ist nicht nur genauer als die Ortsmarkierung von Hand, es bietet v. a. or-

ganisatorische Vorteile, weil so eine vollwertige Meßfahrt von nur einer Person durchgeführt werden kann.

Von besonderer Bedeutung für die Eigenschaften einer elektrischen Temperaturmeßanlage ist die Wahl der eigentlichen *Meßwertgeber.* Für den hier verlangten Zweck stehen v. a. die drei folgenden Systeme zur Verfügung:

– Frei exponierte Widerstandsdrähte,
– in Glas eingeschmolzene Widerstandsdrähte,
– Thermistoren unterschiedlichen Typs.

Will man die Leistungsfähigkeit dieser Systeme abwägen, muß man von der folgenden allgemeinen Überlegung ausgehen (vgl. MÖLLER 1973, Bd. I, S. 60 – 63):

Bei allen gängigen Methoden zur Bestimmung der Luft–Temperatur, d. h. bei Flüssigkeits- und elektrischen Thermometern (im Gegensatz zu den nur in Sonderfällen verwendeten Verfahren, die auf Messung der Schallgeschwindigkeit oder der Wärmestrahlung beruhen), wird diese nicht direkt ermittelt. Gemessen wird vielmehr die Temperatur des Meßfühlers, der mit der umgebenden Luft in Wärmeaustausch steht. Wenn in der umgebenden Luft eine plötzliche Temperaturänderung eintritt, paßt sich die Temperatur des Meßfühlers nur verzögert daran an. Die Anpassung, d. h. die Beseitigung der Temperaturdifferenz zwischen Fühler und Umgebung erfolgt dabei entsprechend einer abklingenden e–Funktion zunächst rasch, dann immer langsamer.

Die Anpassung wird beschrieben durch $\frac{dT}{dt} = -\frac{\alpha_L F}{cM}(T - T_L)$

mit

t	Zeit	[sec]
T	Temperatur des Meßfühlers	[grd]
T_L	Temperatur der Luft	[grd]
α_L	Wärmeübergangszahl (v. a. beeinflußt durch Ventilation)	$[cal \cdot cm^{-2} \cdot sec^{-1} \cdot grd^{-1}]$
F	Oberfläche des Meßfühlers	$[cm^2]$
c	spez. Wärme des Meßfühlers	$[cal \cdot g^{-1} \cdot grd^{-1}]$
M	Masse des Meßfühlers	[gr].

Integration ergibt die Entwicklung der Meßfühlertemperatur T von einer Ausgangstemperatur T_L als

$$T = T_L + (T_o - T_L) \cdot e^{-\frac{\alpha_L F}{c M} t}$$

Die Zeit, in der die Temperaturdifferenz auf $\frac{1}{e} = 0.368$ ihres anfänglichen Wertes abgebaut wird, wird als *Relaxationszeit* bezeichnet. Sinngemäß ist unter den von den Geräteherstellern angegebenen *50 % bzw 90 % Zeiten* die Zeitspanne zu verstehen, in der sich ein Temperaturfühler zu 50 % bzw. 90 % an einen Temperatursprung in der Umgebung angepaßt hat. Wie aus der o. g. Formel zu ersehen, erfolgt die Anpassung umso schneller, je größer die Wärmeübergangszahl und die Oberfläche des Meßfühlers und je geringer seine Masse und seine spezifische Wärme ist.

Frei exponierte, dünne *Widerstandsdrähte* – meist aus Platin– haben sehr geringe Masse und spezifische Wärme (0.032 cal g^{-1} grd^{-1} bei 20 C)und gewendelt trotzdem eine relativ große Oberfläche. Damit sind sehr geringe (<1 sec) Relaxationszeiten und entsprechend entsprechend hochaufgelöste Temperaturmessungen möglich. Außerdem ist infolge der geringen Wärmekapazität (Produkt aus Masse und spezifischer Wärme) der Strahlungsfehler vernachlässigbar klein. Trotzdem sind solche Meßanordnungen für den mobilen Dauereinsatz wenig geeignet, weil sie mechanisch ungemein empfindlich sind und häufige Nacheichungen erfordern. Schon SUNDBORG (1951), einer der Pioniere der Meßfahrttechnik, hat deshalb eine etwas modifizierte Apparatur gewählt, als er den Pt–Draht isoliert in einem Cu–Rohr

unterbrachte und damit Abstriche bei der Trägheit zugunsten größerer Robustheit in Kauf nahm. Auch ZACHARIAS (1972 u. pers. Mitt.) der auf Glimmer gewickelten Pt—Draht verwendete, bestätigt die Anfälligkeit solcher Systeme.

Der Widerstand des Pt ändert sich pro °C um ca. 0.37 %. Soll die Temperatur auf Zehntel Grade genau bestimmt werden, müssen also Widerstandsänderungen von ca. 0.04 % gemessen werden können. Dazu sind empfindliche Geräte und Vorsichtsmaßnahmen z.B. bei den Zuleitungen erforderlich. Bei *Thermistoren,* deren elektrischer Widerstand — im Gegensatz zu Metallen — mit wachsender Temperatur abnimmt, ist dagegen die Widerstandsänderung pro °C um eine Zehnerpotenz größer. Deshalb, und weil sie ebenfalls sehr klein und damit trägheitsarm sind, sind sie in den letzten Jahren als Meßfühler stark in den Vordergrund getreten (vgl. Tab. 10).

Zwar weisen Thermistoren nicht die mechanische Empfindlichkeit der freien Widerstandsdrähte auf, aber der nichtlineare Zusammenhang zwischen Widerstand und Temperatur und große Fertigungstoleranzen mit individuellen Eichkurven für einzelne Exemplare verursachen Schwierigkeiten, insbesondere beim gleichzeitigen Betrieb mehrerer Meßstellen. Bei der von FIMPEL (1956) beschriebenen Anlage wird versucht, diese Probleme durch Parallelschaltung von 3 Thermistoren zu mindern — damit wird aber der Vorteil eines klein dimensionierten Meßfühlers z.T. wieder aufgegeben.

Die hier verwendeten *Meßwiderstände Pt 100 nach DIN 43760* haben mit 50 % bzw. 90 % — Anpassungszeiten von 8 bzw. 22,5 sec größere Trägheit als die ebengenannten Systeme. (Sie sind allerdings immer noch 'schneller' als klassische Quecksilberthermometer, deren Relaxationszeit, d.h. die 63 % — Anpassungszeit, bei 18 sec liegt.) Dies ist darauf zurückzuführen, daß der empfindliche Pt—Draht in einem die Wärmekapazität erhöhenden Hartglaszylinder eingeschmolzen ist.[18] Dieser Tatsache stehen, verglichen mit den anderen Systemen, deutliche Vorteile gegenüber:

- Durch lineare Temperatur—Widerstands—Beziehung einfache Meßsignalverarbeitung auch bei mehreren Meßstellen.
- Keine Alterung (d. h. Veränderung des Widerstands bei längerem Betrieb),
- leichter austauschbar
- Unempfindlichkeit gegen Erschütterungen.

Die Praxis der Meßfahrten hat gezeigt, daß bei einer längerfristigen Untersuchung auch die drei letztgenannten, zunächst vielleicht banal erscheinenden Vorzüge entscheidend wichtig sind. Es kommt dann ganz besonders darauf an, eine robuste, schnell einsatzbereite Anlage zur Verfügung zu haben, die mehrfachen Auf— und Abbau ohne Beschädigungen bzw. ohne die Notwendigkeit langwieriger Neujustierung übersteht.

Überdies zeigt eine prinzipielle Überlegung, daß möglichst geringe Trägheit des Thermometers nicht unbedingt gleichbedeutend mit optimaler Qualität der Messung ist. Aufgrund der Thermometerträgheit werden zwar kurzfristige Schwankungen abgeschwächt wiedergegeben, sehr kurzperiodische sogar völlig unterdrückt, genau das ist aber in gewissem Umfang durchaus erwünscht: Kommt es doch bei einer Untersuchung innerhalb einer Stadt nicht auf die Erfassung der durch wechselnden Straßenbelag, vorbeifahrende Autos, Schatten einzelner Bäume etc. verursachten hochfrequenten Schwankungen der Lufttemperatur an, sondern auf einen charakteristischen Temperaturwert für einen Straßenzug, einen typischen Gebäudeblock, eine Parkanlage oder ein Gebiet von vergleichbarer Größenordnung. Die Mindestgröße einer solchen Fläche läßt sich pragmatisch bestimmen, wenn man davon ausgeht, daß sie in einer topographischen Karte noch lageecht darstellbar sein soll. (Bei 1 : 25 000 bedeckt ein 'Punkt' von 4 mm ⌀ ca. 1260 m^2.) Anders ausgedrückt: Eine hochaufgelöste Temperaturaufzeichnung, die Schwankungen im Meterbereich der Meßfahrtroute registriert, nutzt nichts, weil diese räumlich eng begrenzten Schwankungen nicht sinnvoll auf eine Karte übertragen werden können. Dazu müßte dann erst nachträglich eine künstliche Glättung des Temperaturschriebs vorgenommen werden.

In dieselbe Richtung zielt die Überlegung, daß die Lufttemperatur auch über einen kürzeren Zeitraum nicht wirklich konstant ist. Schon GEIGER hat darauf hingewiesen, daß die Lufttemperatur dauernd und kurzfristig um ± 0.3° C schwankt. Also

„ weichen die an einem trägheitsarmen Meßgerät abgelesenen Einzelwerte im Mittel ± 0.3° vom Mittelwert einer größeren Reihe von Meßwerten ab bzw. streuen in dieser Stärke um den langfristigen Verlauf."

Daraus leitet sich die Folgerung ab, daß es

„völlig verfehlt (ist), generell möglichst trägheitsarme — 'die wahren Werte zeigende' — Meßgeräte anzustreben, da dann die Meßwerte nicht Mittelwerte der Meßintervalle, sondern Zufallswerte darstellen." (GEIGER 1961, S. 549/550)

Die angegebenen Gründe lassen die Verwendung von Meßelementen angebracht erscheinen, auch wenn sie auf den ersten Blick perfektionistischen Ansprüchen nicht gerecht zu werden scheinen.

Allerdings muß man sich darüber im klaren sein, daß bei mobilem Einsatz mit schneller Aufeinanderfolge verschiedener Temperaturmilieus aufgrund der verzögerten Anpassung die für den stationären Betrieb ermittelte *Meßgenauigkeit* Einbußen erleidet. Nach den Angaben der Hersteller der einzelnen Komponenten und nach experimenteller Überprüfung (Vergleich mit Aßmann'schem Aspirationspsychrometer bzw. Eichung im thermostatisch geregelten Wasserbad mit Hg—Thermometerkontrolle) beträgt die *relative Genauigkeit* mindestens 0.2°C. Nach Eichung liegt die *absolute Genauigkeit* in dieser Größenordnung. Da ein kurzfristig eintretender Temperatursprung in der oben geschilderten Weise nur verzögert und damit unvollständig erfaßt wird, ist es nicht sinnvoll, Angaben zu machen, die eine größere Genauigkeit als *0.5° C* vortäuschen. Auf den Karten der Temperaturverteilung wurden deshalb die Isothermen auch mit 1° — Abstand eingetragen, obwohl eine weitere Unterteilung z. T. durchaus möglich gewesen wäre.

2.2.2. Routenwahl

Neben den Eigenschaften der Meßapparatur entscheidet auch die Wahl der Strecke, auf der eine Meßfahrt durchgeführt wird, übere deren Aussagemöglichkeiten. Im folgenden werden die Forderungen skizziert, die für ein optimales Meßfahrtergebnis erfüllt werden sollten. Dieser Katalog von Forderungen ist das Ergebnis der Analyse der entsprechenden Literatur, vor allem aber der Erfahrungen aus einer längeren Experimentierphase mit der oben beschriebenen Apparatur und der zugrunde liegenden methodischen Überlungen.

Das oben (C 1.3.) erläuterte Beispiel der früh von W. PEPPLER in Karlsruhe durchgeführten Meßfahrt zeigt, daß kurze Profilserien unbefriedigend sind, wenn sie für Aussagen über die flächenhafte Temperaturverteilung benutzt werden sollen. Daraus ergibt sich als erste Forderung: *Meßfahrtstrecken* müssen möglichst *lang* sein, damit eine möglichst große Fläche tatsächlich messend erfaßt werden kann und nicht aus Analogievorstellungen 'erschlossen' werden muß.

Da einerseits mit wachsender Streckenlänge die zur Messung erforderliche Zeit zunimmt und da andererseits bei der angestrebten quasi—synchronen Temperaturaufnahme der Einfluß des allgemeinen Tagesganges der Temperatur klein, zumindest korrigierbar, bleiben muß, ergibt sich aus der ersten Forderung unmittelbar eine konkurrierende zweite: *Meßfahrten* müssen in möglichst *kurzer Zeit* abgewickelt werden. Die bei gegebener Zeit zu bewältigende Strecke hängt von den Qualitäten der Apparatur ab. Bei der hier verwendeten kann in einer Stunde ein kontinuierliches Meßprofil von 30 km Länge erstellt werden.

Für detaillierte Aussagen über das Temperaturfeld einer Stadt muß die Meßfahrtroute — 3. Forderung — möglichst *unterschiedliche Geländetypen bzw. Bebauungszonen* innerhalb der Stadt durchschneiden um einen Zusammenhang zwischen Bebauungsstruktur und Temperaturmilieu herstellen zu können.

Schließlich muß im Interesse einer kontrollierbaren Auswertung die Strecke so gelegt werden, daß bestimmte markante Punkte (z. B. Straßenkreuzungen) in zeitlichem Abstand mehrfach angefahren werden. Damit ergibt sich ein unmittelbarer Einblick in die während der Dauer einer Meßfahrt erfolgenden Temperaturänderungen. Vorteilhaft ist es, solche Kontrollpunkte nicht nur an einer Stelle, etwa im Stadtzentrum, sondern an mehreren Orten (z. B. Zentrum und Peripherie in verschiedenen Richtungen) zur Verfügung zu haben, weil ja die tageszeitliche Temperaturveränderung in Stadt bzw. Freiland nicht in jeder Phase des Tagesganges gleicht verläuft. Als 4. Forderung ergibt sich also: Anlage der *Meßfahrtstrecke in Schleifenform* mit mehrfachen Kreuzungspunkten.

Der 5. Punkt sollte ebenfalls wegen der besseren nachträglichen Kontrolle berücksichtigt werden: *Anschluß der Meßfahrtstrecke an eine kontinuierlich registrierende Meßstation.* Bei dem hier gewählten Auswerteverfahren hat es sich als besonders günstig erwiesen, daß diese Station etwa in der zeitlichen Mitte einer Meßfahrt angesteuert wurde (vgl. unten 2.2.4.).

Die 6. Forderung schließlich ist pragmatischer Art, im städtischen Bereich aber von nicht zu unterschätzender Wichtigkeit: Eine *Meßfahrtroute* muß *verkehrsgerecht* angelegt sein. Damit ist gemeint, daß eine Route nach einiger Erfahrung so gelegt werden kann, daß sie den Forderungen 3 und 4 genügt und außerdem, trotz der geringen einzuhaltenden Fahrgeschwindigkeit, günstige Ampelschaltungen ('grüne Welle') ausnützt bzw. chronisch überlastete Strassen und Kreuzungen meidet (z.B. durch bevorzugtes Rechts— statt Linksabbiegen). Dies kommt der in gegebener Zeit zu bewältigenden Strecke (Forderung 2) zugute.

Nach Abwägung dieser Kriterien hat sich in Freiburg die in Karte 1 wiedergegebene Route als vorteilhaft erwiesen. Sie wurde bei der Mehrzahl der durchgeführten 'großen' Meßfahrten benutzt. Die Streckenlänge beträgt *55 km*, dafür wurden rund 2 Stunden benötigt. Bei einer Punktfolge von 2 sec bedeutet das rund 3600 Einzelmessungen bzw. rund 900 Meßpunkte für jede der 4 Meßstellen (= 16.4 Meßpunkte / km). Gestrichelt sind Alternativvarianten dargestellt. Kleinere Umleitungen mußten von Zeit zu Zeit in Kauf genommen werden.

Ließ die Wetterlage ein nur wenig differenziertes Bild der Temperaturverteilung erwarten, wurde eine kürzere Route befahren, die aber ebenfalls alle Stadtteile berührte, wenn auch in geringerer Dichte (28 bzw. 42 km in ca. 1 bzw. 1 1/2 Stunden).

Im Normalfall begannen die Fahrten im Osten der Stadt in Littenweiler, durchquerten die Innenstadt und das nördlich anschließende Herdern und berührten nach etwa der Hälfte der Gesamtdistanz die Meßstation E (vgl. Karte 1) im Westen in Betzenhausen, die den Anschluß an das amtliche Stationsnetz ermöglicht.[19] Von hier aus führten sie durch die südlichen und südwestlichen Stadtteile (Weingarten, Haslach, St. Georgen) über die nördlichen und nordwestlichen (Mooswald, Landwasser, Industriegebiet Nord) und erneut über Innenstadt und Wiehre zurück nach Littenweiler. Zu Beginn der Untersuchung wurde auch Lehen und das Lehener Bergle regelmäßig angefahren. Auf eine Aufzählung aller einzelnen Straßen wird verzichtet; bei Besprechung der Ergebnisse werden die wichtigsten Stellen auch namentlich genannt.

2.2.3. Meßtermine

Eine Meßfahrt nimmt, wie oben geschildert, 1 — 2 Stunden in Anspruch, als Ergebnis ist aber die auf einen einheitlichen Zeitpunkt bezogene quasi—synchrone Aufnahme eines grösseren Raumes angestrebt. Zwangsläufig ergibt sich daraus die Schwierigkeit der Trennung der durch das Gelände (im weitesten Sinne) bedingten Temperaturänderungen von denen, die durch den allgemeinen Tagesgang der Temperatur bedingt sind. Das Problem läßt sich minimalisieren, wenn für die Meßfahrten Termine gewählt werden, die mit den Tageszeiten geringer zeitlicher Temperaturänderung zusammenfallen. Das ist unter autochthonem Strahlungswettereinfluß[20] im Bereich des Temperatur—Maximums am frühen Nachmittag sowie im Bereich des Minimums um Sonnenaufgang der Fall. Die zu diesen Terminen durchgeführ-

ten Messungen werden im folgenden als *Mittags– und Morgenmeßfahrten bezeichnet.* Bei letzteren wurde darauf geachtet, daß die Meßfahrten mit Sonnenaufgang abgeschlossen waren, um den dann einsetzenden steilen Temperaturanstieg auszuschließen.

Die stadtklimatisch interessanteste Situation stellt sich allerdings in den frühen Nachtstunden ein. Zu dieser Zeit prägen sich die maximalen Temperaturdifferenzierungen zwischen Stadtgebieten mit unterschiedlicher Baustruktur aus und die Temperaturdifferenz zwischen Stadt und Umland (Wärmeinseleffekt) erreicht maximale Werte. Aus diesem Grunde wurden zahlreiche *Abend– bzw. Nachtmeßfahrten* durchgeführt. Zwar ist während der frühen Nachtstunden die Temperaturänderung pro Zeiteinheit besonders groß, aber während dieser Zeit kann am ehesten von einer linearen Temperaturabnahme ausgegangen werden, so daß der allgemeine Tagesgang relativ einfach korrigiert werden kann.

Die genauen Termine der durchgeführten Meßfahrten und die jeweils herrschenden meteorologischen Bedingungen sind in Tabelle 13 zusammengefaßt.

2.2.4. Korrektur, Auswertung und Darstellung

Die Korrektur des Tagesganges und die Vorauswertung wurde unmittelbar auf dem vom Kompensationsschreiber ausgegebenen Papierstreifen vorgenommen. Zunächst wurden die mit der in 2.2.1 geschilderten Unterbrecherschaltung an den Rand des Papierstreifens gesetzten Markierungspunkte anhand des Tonbandprotokolls mit den entsprechenden Ortsnamen beschriftet. Die Einfachheit des Verfahrens gestattet eine zeitlich dichte Folge solcher *Ortsmarkierungen* (pro Meßfahrt bis zu 120). Der zurückgelegte Weg kann so jederzeit rekonstruiert werden.

Das Verfahren der Korrektur und der weiteren Auswertung wird anhand der Abb. 8a und 8b erläutert.

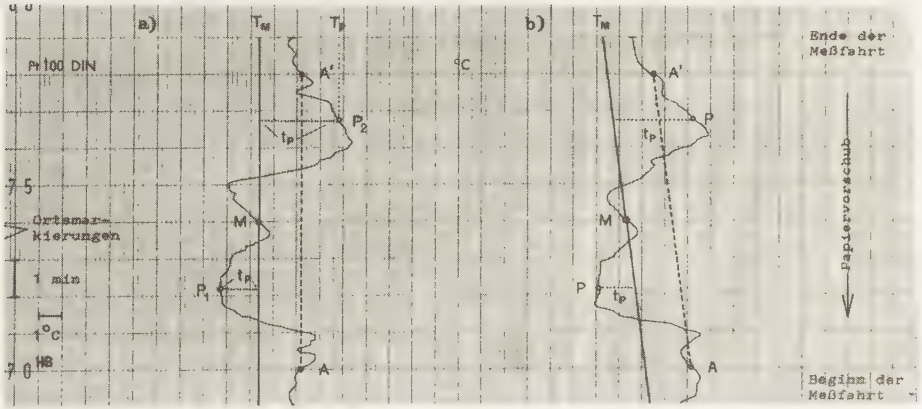


Abb. 8: Schema zu Auswertung und Korrektur der Temperaturaufzeichnungen am 'Polycomp 2'
a) bei unveränderter Temperatur am Punkt A
b) bei während der Dauer einer Meßfahrt veränderter Temperatur am Punkt A (Erläuterungen im Text).
Die Schemazeichnungen sind auf dem Originalmeßstreifen eingetragen, links unten ist der Papiervorschub/Minute und die °C–Graduierung angegeben.

Jede Meßfahrt führt, wie oben geschildert, zu ihrem Ausgangspunkt zurück, zu Beginn und am Ende wird derselbe Punkt angefahren (A bzw. A'). Es soll nun zunächst davon ausgegangen werden, daß A u. A' dieselbe bzw. nur geringfügig unterschiedliche (± 0.3° C) Temperatur aufweisen ($T_A \cong T_{A'}$), eine Tagesgang–Korrektur also nicht erforderlich ist. Anhand der Orts– / Zeitmarkierungen wird die Stelle des Temperaturschriebs ermittelt, die beim Vorbeifahren an der festinstallierten *Vergleichsstation* E „Betzenhausen" aufgezeichnet wurde. Die Route war so angelegt, daß dieser Punkt etwa nach der Hälfte der beabsichtigten Meßzeit erreicht wurde, also in der Mitte des Meßstreifens liegt; er wird deshalb mit M bezeichnet. Bei allen Meßfahrten wurde die Temperatur dieses Punktes (T_M) als *Nullwert* gesetzt, d. h. die Temperatur an einem beliebigen Punkt P wurde jeweils als positive oder negative Abweichung in °C gegenüber T_M angegeben ($T_P = T_M + t_P$). Der gesuchte Wert $t_{P1, P2}$ für einen beliebigen Punkt P_1 oder P_2 entspricht also der Länge des Lotes von P_1 bzw. P_2 auf T_M. In der Praxis konnte er sehr einfach mit einem Ableselineal ermittelt werden, das dieselbe Graduierung wie das Aufzeichnungspapier hat. Diese *t_p–Werte* wurden direkt in einen Stadtplan übertragen und bildeten so das Grundgerüst für die Isothermenkarten.

Eine weitere Kontrollmöglichkeit ergibt sich aus dem Vergleich der Temperaturen an den mehrfach angesteuerten Punkten (*Schleifen*). Solche Punkte waren z. B. Elsässerstr. / Berliner Allee, Breisacher– / Eschholzstr., Eschholz– / Baslerstr., Kaiserstr. / Dreisambrücke, Siegesdenkmal, Schwabentorbrücke. Die direkte Übertragung von rund 200 t_P–Werten pro Meßfahrt in einen Stadtplan liefert ein so dichtes Wertenetz, daß *Linien gleicher t_P – Abweichung von T_M* zuverlässig gezeichnet werden können, d. h. daß auf Analogieannahmen, die beim Zeichnen von Isolinien häufig zu Hilfe genommen werden, weitgehend verzichtet werden kann. Dabei war die kontinuierliche Aufzeichnung hilfreich, die es gestattete, die Lage einer Isolinie zwischen zwei vorher ausgewählten t_P–Werten durch Vergleich mit dem Ausgangsmaterial genauer festzulegen, als es der sonst geübten Praxis proportionaler Teilung der Distanz zwischen zwei Punkten entspricht. Nur im Fall einer durch fehlende Meßwerte verursachten Lücke in einer das Stadtgebiet ansonsten mehr oder weniger ringförmig umgreifenden Isolinie wurde diese mit einer gerissenen Linie ergänzt. In Zweifelsfällen wurde auf eine Linienführung ganz verzichtet und stattdessen nur ein Zahlenwert angegeben. Um die Führung der Isolinien nachvollziehbar zu machen, wurden in einige Karten rund 100 Punkte mit den entsprechenden t_P – Werten übernommen.[22] Das Resultat sind gut abgesicherte Karten der Verteilung der Lufttemperatur im Stadtgebiet von Freiburg in *Isanomalen–Darstellung.* Die tatsächliche Temperatur an der Station E „Betzenhausen", also T_M, ist an der entsprechenden Stelle in einem Kreis oder Rechteck angegeben. Durch diesen Punkt zieht die Linie, die alle Orte mit der *Temperatur der Station E* verbindet (*0–Linie).* Darauf folgen die Linien, die Punkte mit gleicher Abweichung von T_M im Abstand von je 1° C (+ 1,–1 – Linie etc.). Die tatsächliche Temperatur eines beliebigen Linienpunktes läßt sich also einfach durch Addition des Linienwertes zu dem im Kreis angegebenen Wert ermitteln. Vorteil dieser Bezeichnungsweise ist die gute Vergleichbarkeit mehrerer Einzel–Karten. Dieses Verfahren (Verwendung der Abweichungen von einem Nullwert) hat den Vorteil, daß unabhängig vom jeweiligen absoluten Temperaturniveau eine übersichtliche *Vergleichbarkeit* verschiedener Meßfahrten möglich ist.

Wie schon beschrieben, ist insbesondere bei den Nachtmeßfahrten nicht damit zu rechnen, daß T_A und $T_{A'}$ identisch sind. Vielmehr sinkt die Lufttemperatur nach einem Strahlungstag in den ersten Nachtstunden so stark, daß T_A, nach den 2 Stunden einer Meßfahrt 2 – 4° C niedriger ist als T_A. Dieser Einfluß des Tagesganges wurde folgendermaßen korrigiert: A und A' wurden durch eine Gerade verbunden, diese wurde parallel bis in den Punkt M verschoben. So erhält man eine die vertikalen Isothermen des Aufzeichnungspapiers unter sehr spitzem Winkel schneidende *Nullwert–Linie,* die der T_M–Linie im oben geschilderten Beispiel entspricht. Sie hat von A und A' denselben horizontalen Abstand, liefert also trotz allgemeiner Temperaturänderung $t_A = t_{A'}$. Zur Bestimmung eines beliebigen T_p muß in diesem Fall natürlich nicht das Lot sondern die Horizontaldistanz von P bis zur Nullwert–Linie ermittelt werden.

Es wird auf diese Weise also ein Korrekturverfahren praktiziert, das nicht auf rechnerischer Reduzierung einiger Punkte basiert, sondern der kontinuierlichen Aufzeichnung angepaßt ist.[21] Freilich wird die darin enthaltene Annahme der linearen Temperaturänderung zwischen A und A' der Realität nicht ganz gerecht, da zwischen beiden Punkten i. d. R. Gelände mit unterschiedlichem thermischem Verhalten, d. h. unterschiedlichem Δt/Zeiteinheit, durchfahren wird. Insbesondere erfolgt die Abkühlung in Stadt und Freiland nicht synchron. Deshalb wurde der Punkt A, der zusammen mit A' die Neigung der Nullwert–Linie bestimmt, so gewählt, daß er im Übergangsbereich zwischen Stadt und Freiland liegt (konkret: Abzweigung Hansjakob–/Schwarzwaldstr. beim Gasthaus Schiff östlich des Meßplatzes). Die durch unterschiedliches Δt/Zeit bedingte Ungenauigkeit der Korrekturgeraden wird dadurch möglichst klein gehalten.

3. Charakterisierung des Untersuchungsgebiets

3.1. Abgrenzung

Die stadtklimatologische Untersuchung erstreckt sich auf die zusammenhängend besiedelte Fläche der Stadt Freiburg im Breisgau und einige Ausschnitte aus dem unmittelbar angrenzenden außerstädtischen Freiland. Bei der Abgrenzung wurde weniger von den Gemarkungsgrenzen als von der tatsächlichen Stadtmorphologie und den praktischen Erfordernissen der Routenwahl für die Meßfahrten ausgegangen. So konnten der völlig isoliert liegende Stadtteil Günterstal und die nordöstlichen Teile von Zähringen nicht berücksichtigt werden, das zum Zeitpunkt der Untersuchung noch nicht eingemeindete Dorf Lehen wurde dagegen z. T. miteinbezogen. Die im Zuge der Gemeindereform nach 1972 zur Stadt Freiburg gekommenen, aber isoliert von der eigentlichen Stadt gelegenen Ortschaften blieben unberücksichtigt. Besonderer Wert wurde auf die Einbeziehung der neuen Stadtteile im Westen (Weingarten, Bischofslinde, Landwasser) gelegt. Die Fläche des bearbeiteten Areals beträgt ca. 3000 ha.

3.2. Topographische Situation

Die Lage Freiburgs an der Landschaftsgrenze zwischen Schwarzwald und Oberrheinischem Tiefland ist durch zwei für die klimatische Differenzierung relevante Besonderheiten gekennzeichnet:

– Die sog. Vorbergzone[23], die weiter im N und im S den Reliefgegensatz zwischen den beiden Großlandschaften überbrückt, ist bis auf einige meist isolierte Schollen im Bereich der Freiburger Bucht nicht vorhanden. In unmittelbarer Stadtnähe steigt das Gelände deshalb schnell an. Roßkopf (737 m) und Kybfelsen (838 m) liegen nur je 4 km NE bzw. SE des Stadtzentrums und leiten direkt zum Hochschwarzwald (Kandel bzw. Schauinsland) über. Nach S bildet das Schönbergmassiv (646 m) als höchster Teil der südlich Freiburg wieder einsetzenden Vorbergzone einen markanten Abschluß.

– Die Stadt liegt am Austritt der Dreisam in die freie Rheinebene. Nach Form und Entstehung ist dieses Tal aber nicht mit anderen Schwarzwaldrandtälern vergleichbar. Von einer nur 700 m breiten Engstelle unmittelbar südöstlich der Altstadt weitet es sich nach E zum großräumigen (ca. 25 km^2) Zartener Becken[24], das die zahlreichen Quellbäche der Dreisam aus N, E und S sammelt. Die Oberfläche des Zartener Beckens und des Geländes westlich der genannten Engstelle bildet ein durchgehender, spät–würmzeitlicher, flach und gleichmäßig von E nach W abfallender Schwemmkegel, in den sich die Dreisam postglazial wieder um einige Meter eingeschnitten hat.

  Trotz der Gebirgsrandlage bedeckt die Stadt damit eine reliefarme, weitgehend ebene, wenn auch zunächst von E nach W, dann auch fächerförmig nach SW und N geneigte

Oberfläche. Vor allem die neuen Stadtteile im W im Bereich abnehmenden Schwemmkegelgefälles lassen keinen Reliefunterschied gegenüber der freien Rheinebene erkennen. Auszunehmen sind lediglich die Einfamilienhausgebiete in Hanglage (Schönbergfuß, Lorettoberg, Teile von Littenweiler, Herdern und Zähringen).

Für die hier im Mittelpunkt stehenden Klimaelemente Temperatur und Wind wird deshalb eine Differenzierung nicht nur in Abhängigkeit von Baustruktur der Stadt, sondern auch von der Topographie zu erwarten sein (Hangzone, Gebiete mit Bergschatten). Die im wesentlichen ebene Lage der Stadt bietet Vorteile bei der Trennung beider Faktoren (≠z. B. Stuttgart, HAMM 1969). Soweit andere Klimaelemente angesprochen werden, wird auch dort der topographische Einfluß zu berücksichtigen sein.

Einige Angaben zur Höhenlage der wichtigsten Stadtteile sollen das Bild vervollständigen. Der höchste Teil der Altstadt liegt in umnittelbarer Nachbarschaft der markanten Spitze des Schloßberges (Schwabentor, 285 m). Von dort aus dacht sich der Schwemmkegel nach N und W zunächst deutlich, mit zunehmender Entfernung schwächer ab. (N: Münster 279 m, Keplergymnasium 268 m, Komturplatz 252 m; W: Universität 275 m, Hauptbahnhof 268 m, Bischolfslinde 250 m). Die 250 m – Isohypse umschließt die Altstadt von N über W nach SW als fast konzentrischer Teilkreis in 2 – 2.5 km Entfernung. Die tiefstgelegenen Teile der Stadt – im W das Gewerbegebiet Haid, im NW Landwasser, im N das Industriegebiet Nord – liegen alle um 230 m hoch. Die höchsten zusammenhängend bebauten Stadtteile liegen südöstlich der Innenstadt im Dreisamtal (Bahnhof Littenweiler 318 m). Das mittlere Gefälle zwischen Littenweiler (Bhf.) und dem 8.5 km entfernten Landwasser beträgt 1.03 %.

3.3. Stadtentwicklung

Die Ausdehnung der auf die Gründungsanlage von 1120 zurückgehenden Altstadt wird noch vom Verlauf der Innenstadtringstraße (Schloßberg–, Friedrich–, Rotteckring) und die Linie Schwabentor – Universität nachgezeichnet (ca. 50 ha). Die hochmittelalterlichen Stadterweiterungen (Neuburg im N, Predigervorstadt und Lehenervorstadt im W, Schnekkenvorstadt zwischen Altstadt und Dreisam) wurden bei der Anlage des barocken Festungsgürtels wieder beseitigt. Noch Ende des 18. Jh. war die Stadt nicht größer als die älteste Anlage. Die seit Mitte des 19. Jh. wie andernorts entstehenden ersten Industriebetriebe wurden noch in unmittelbarer Nähe der Altstadt, in einem schmalen Streifen zwischen Schloßbergsüdhang und Dreisam angesiedelt. Zum Zeitpunkt der Errichtung der Oberrheintaleisenbahn (in Freiburg: 1845) war ein breiter Geländestreifen zwischen Bahnhof und Altstadt Gartenbaugebiet. (Vgl. auch SCHWINEKÖPER 1975). In der zweiten Hälfte des 19. Jh. und zu Beginn des 20. Jh. wuchs die Stadt dann schnell mit den – sehr unterschiedlich gestalteten – gründerzeitlichen Stadtvierteln (Neu–)Herdern, Wiehre und Stühlinger.

Völlig isoliert von der Stadt waren bis dahin die umliegenden Dörfer: Zähringen (Eingemeindungsjahr: 1906), Herdern (1538), Littenweiler (1914), Günterstal (1890), St. Georgen (1938) liegen wie die Altstadt am Hangfuß des Schwarzwaldes bzw. des Schönbergs, Haslach (1890), Betzenhausen (1908) und Lehen (1973) dagegen frei in der Rheinebend. Zwar setzte in diesen Orten bsd. nach den Eingemeindungen der Jahrhundertwende ein eigenes, durch die Nähe Freiburgs verursachtes Wachstum ein, aber nur Herdern war schon anfangs des 20. Jh. auch baulich an die Stadt angeschlossen. Die übrigen Vororte waren noch nach 1945 durch breite Zonen offenen Landes von der Stadt getrennt. Die charakteristischen großflächig–gleichförmigen Siedlungsanlagen der unmittelbaren Nachkriegszeit und der 60er und 70er Jahre haben heute – mit der Ausnahme Günterstal – alle Lücken zwischen den an der Baustruktur noch erkennbaren alten Dorfkernen und der Innenstadt geschlossen. Die jüngsten und ausgedehntesten neuen Siedlungen sind dabei im W der Stadt entstanden (Weingarten, Bischofslinde, Landwasser).[25]

3.4. Flächennutzung

Gegenwärtig, d. h. nach dem 1.1.1975, umfaßt die Gemarkung der Stadt 15 168 ha. Darin sind die jüngsten Eingemeindungen Ebnet, Hochdorf, Kappel, Lehen, Munzingen, Opfingen, Tiengen, Waltershofen enthalten. Für unsere Zwecke ist vom alten Gebietsstand Freiburgs auszugehen, der über Jahrzehnte 7998 bzw. 7990 ha betrug.

Die Aufgliederung entsprechend dem Flächennutzungsplan 1970 und die Vergleichszahlen für 1938 gehen aus Tab. 12 hervor.

Tabelle 12: Flächengliederung der Gemarkung der Stadt Freiburg 1938 und 1970.
Quelle: Flächennutzungsplanentwurf 1970,
Hg. v. Stadtplanungsamt Freiburg 1970.

	1938		1970	
	ha	%	ha	%
Bebaute Fläche (Wohnbaufläche, gemischte Baufläche, Sonderbaufläche, Fläche f. Gemeindebedarf und Versorgungseinrichtungen)	735.82	9.2	1741.82	21.8
Verkehrsfläche (Straße, Bahn, Flugplatz)	719.82	9.0	767.04	9.6
Freiflächen (Grünanlagen, Kleingärten, Friedhöfe, Sportanlagen)	551.86	6.9	295.63	3.7
Landwirtschaftliche Fläche	2151.46	26.9	1398.25	17.5
Forstwirtschaftliche Fläche	3711.07	46.4	3659.42	45.8
Gewässer und sonstige Flächen	127.97	1.6	127.84	1.6
	7998.00	100.0	7990.00	100.0

Es ist zu ersehen, daß die Zunahme der bebauten Fläche um 136 % vor allem auf Kosten der landwirtschaftlichen Fläche erfolgt ist. Darin spiegelt sich insbesondere die Aufsiedelung der zwischen den Wachstumsspitzen im W gelegenen Zungen ackerbaulich genutzten Geländes wieder. Waldflächen wurden bei der Siedlungsausdehnung kaum in Anspruch genommen.

4. Ergebnisse

4.1. Ortsfestes Stationsnetz

4.1.1 Vorbemerkung

Zweck des mit Thermohygrographen ausgerüsteten Stationsnetzes (vgl. oben C.2.1.) war es,

- die jeweils kurzfristigen Meßfahrten an kontinuierliche Registrierungen anschließen zu können, und
- für ausgewählte Zeiträume einen Überblick über die klimatische Differenzierung im Stadtgebiet nicht nur für einen Zeitpunkt, sondern im Tagesgang, zu gewinnen.

Langfristige Mittelwerte für die einzelnen Stationen wurden nicht angestrebt, weil dafür die Reihen relativ kurz hätten bleiben müssen, Beobachtungslücken nicht vermeidbar waren und v. a. weil damit die in konkreten Situationen vorhandenen Differenzierungen verschleiert würden. Außerdem liegen entsprechende Daten bereits vor: V. RUDLOFF (1957, S. 48) hat versucht, die Werte der häufig wechselnden Freiburger Beobachtungsstationen auf den einheitlichen Zeitraum 1871 – 1950 zu reduzieren und damit zu Monats– und Jahresmitteln für elf Stationen im Stadtgebiet zu gelangen.

Im folgenden wird der Tagesgang der Lufttemperatur an den sechs Stationen für jeweils einen kurzen Zeitraum aus den vier Hauptjahreszeiten dargestellt. Die Auswahl ist folgendermaßen begründet: Es sollten alle Jahreszeiten vertreten sein, die ausgewählten Perioden zudem etwa gleichmäßig über das Jahr verteilt sein. Es sollten nur austauscharme, antizyklonale Wetterlagen berücksichtigt werden, weil nur bei den damit verbundenen autochthon bestimmten Witterungsgeschehen kleinräumige thermische Unterschiede deutlich in Erscheinung treten. Diese Wetterlage sollte ferner für mindestens vier Tage wetterbestimmend sein (Mitteilung über vier Tage).

Anhand der Großwetterlagenstatistik (DWD) und der Tabellierung der Tagesamplituden der Lufttemperatur wurden diese Kriterien überprüft und die im Text zu den Abb. 9 - 12 genannten Zeiträume ausgewählt. Zufälligerweise handelt es sich in keinem der Fälle um eine der eigentlichen 'klassischen' Hochdrucklagen wie BM oder HM, sondern um antizyklonal geprägte, d. h. mit Absinktendenz verbundene Lagen bei zonaler Zirkulation. Die gleichmässige Verteilung über das Jahr konnte nicht ganz eingehalten werden (nur 2 statt 3 Monate zwischen Winter– und Frühlingsperiode). Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit sind jeweils zwei Stationen durch eine Markierung zusammengefaßt; es werden so die Stationen in der Innenstadt (A und B), im Osten (C und D) und am Westrand des bebauten Gebiets (E und F) unterschieden. Gegenüber sonst üblicher Darstellung ist die Ordinate bewußt weit gespreizt, um die Differenzen zwischen den einzelnen Stationen zu betonen. Die Punkte repräsentieren Stundenmittelwerte; sie sind deshalb bei den jeweiligen Halbstunden angetragen (Mittel 0 – 1 Uhr bei 0.30 Uhr etc.). – In ähnlicher Form, bis auf eine Ausnahme aber mit anderen Perioden, wurde dieses Material auch schon bei WEISCHET (1974[b]) und NÜBLER (1975) dargestellt.

4.1.2. Tagesgang der Lufttemperatur an sechs Stationen bei antizyklonalen Wetterlagen

Winter (16.1. – 19.1.1972, Abb. 9): Bei insgesamt niedrigem Temperaturniveau (höchstens Tagesmaximum –0.6°) sind ganztägig deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Stadtbereichen vorhanden. Die Stationen am westlichen Stadtrand weisen durchweg die geringsten, die in der Innenstadt die höchsten Temperaturen auf; die Stationen im Osten liegen dazwischen. Das Maximum von Station F liegt nur 0.6° über dem Minimum von Station A. Die Differenz zwischen kältester und wärmster Station, – sowie die Relation zwischen den übrigen Stationen – bleibt ganztätig annähernd gleich; sie beträgt zur Zeit des Tagesmaximums 2.4°, zur Zeit des Minimums 3.0°, am größten ist sie mit 3.2° zwischen 1 und 2 sowie zwischen 5 und 6 Uhr. Der Tagesgang verläuft also in der Innenstadt und in den anderen Stadtbereichen bemerkenswert parallel, nur auf jeweils verschiedenem Niveau. Dies kommt auch darin zum Ausdruck, daß die Tagesamplitude der Innenstadtstationen A und B mit 3.0° und 3.8° nur geringfügigvon der mehr außerhalb gelegenen Stationen C bis F (3.5°, 3.6°, 3.8°, 3.1°) abweicht.

Innerhalb der einzelnen Stadtteile sind – v. a. im Hinblick auf den Vergleich mit den anschließend zu besprechenden Perioden – die folgenden Besonderheiten anzuführen: Die von allen Seiten mit großen Gebäuden umgebene und mitten in der Altstadt gelegene Station 'Rathaus' weist durchweg geringfügig höhere Temperaturen auf als das Wetteramt, das in der nordwestlichen Innenstadt zwar auch von Hochhäusern umgeben ist, jedoch an einer

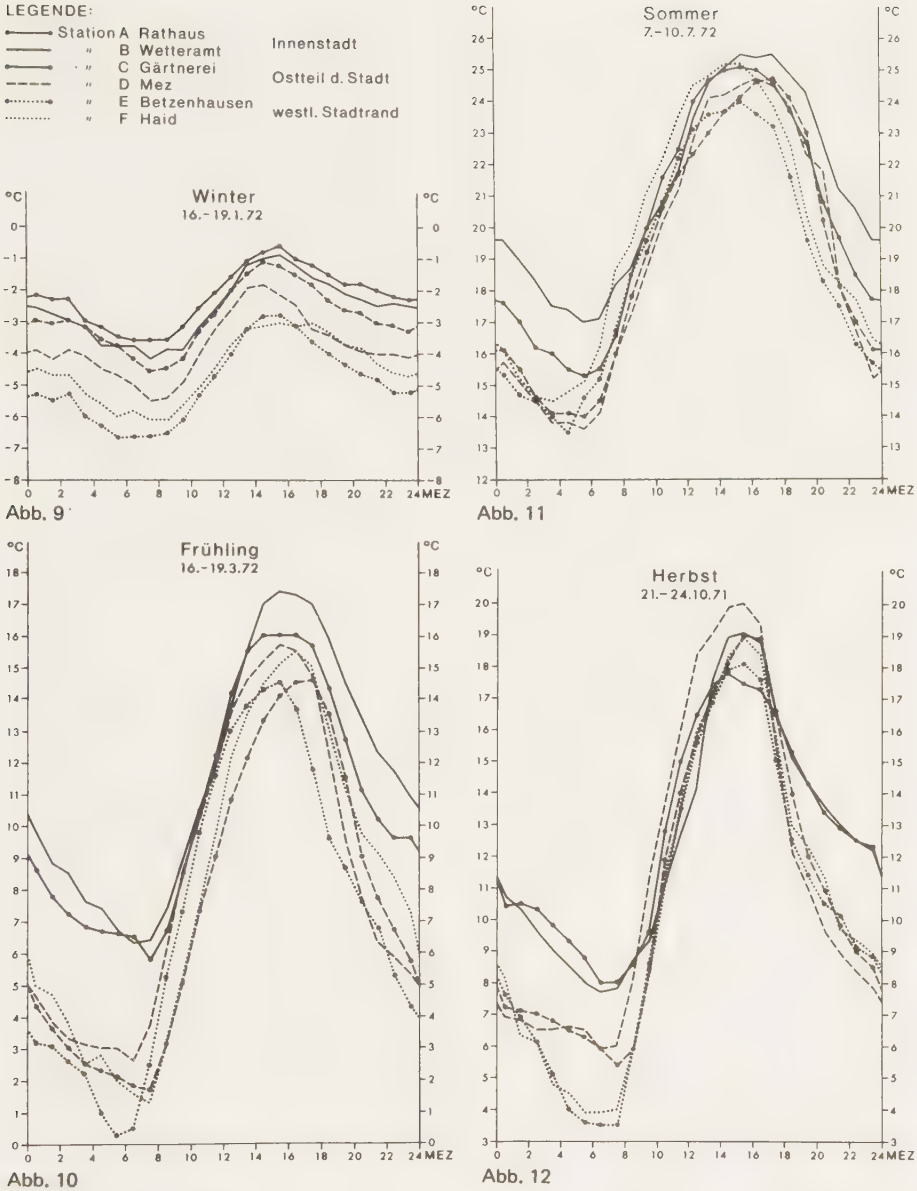


Abb. 9

Abb. 11

Abb. 10

Abb. 12

Abb. 9 – 12: Tagesgang der Lufttemperatur an 6 Stationen in Freiburg bei antizyklonalen Wetterlagen.

Jeweils 4–Tage–Mittelwerte der folgenden Zeiträume:

16. – 19. 1. 1972	Großwetterlage	SEa	(Abb. 9)
16. – 19. 3. 1972	Großwetterlage	SEa	(Abb. 10)
7. – 10. 7. 1972	Großwetterlage	Wa	(Abb. 11)
21. – 24.10. 1971	Großwetterlage	Wa	(Abb. 12)

[Großwetterlagen nach HESS u. BREZOWSKY (1952), vgl. auch Erläuterung zu Tab. 13, Spalte 8]

Durchgangsstraße nicht so geschützt liegt. Von den beiden östlichen ist die am Hang ca. 30 m über dem Talboden und außerhalb der Bebauung gelegene Station D durchweg um rund 1° kälter als die benachbarte Station C; um geringsten ist die Differenz zwischen beiden mit 0.4 – 0.8° während des Temperaturanstiegs zwischen 10 und 13 Uhr. Ähnliches gilt für E und F, wobei das – auch gegenüber den übrigen Stationen – verzögerte Absinken der Temperatur nach 17 Uhr an der im SW vor der Stadt gelegenen Station F auffällt.

Frühling (16. – 19.3.1972, Abb. 10): Die auffallendste Veränderung gegenüber der Winter–Situation ist die an allen Stationen großen Tagesamplituden. So ergibt sich aus dem steilen Temperaturanstieg zwischen 8 und 15 Uhr und dem ebenso steilen Abfall nach 16 Uhr, bei dem in der Innenstadt Temperaturänderungen um 1.5°/Stunde, an den übrigen Stationen sogar um 2.5°/Stunde vorkommen. Die beiden Innenstadtstationen A und B heben sich ganz klar von den übrigen ab: Die Maxima am Nachmittag liegen höher und halten mit geringen Schwankungen über vier Stunden an, die abendliche Abkühlung setzt verzögert ein und vollzieht sich mit geringeren zeitlichen Temperaturänderungen, so daß schon um 19 Uhr die Differenz zwischen wärmster und kältester Station knapp 6° beträgt, die sich bis 24 Uhr auf 6.6° vergrößert. Bis zum Tagesminimum bleibt dann die Innenstadt zwischen 5° und 6° wärmer als die östlichen und westlichen Vororte: Während in Betzenhausen das Minimum in Gefrierpunktnähe liegt, sinkt die Temperatur in der Innenstadt nicht unter 5.8°. Das Ergebnis ist eine Tagesamplitude von 10.2° (A) bzw. 11.1° (B), die trotz der hohen Mittagswerte deutlich geringer ist als im Osten (C: 12.9°, D: 13.1°) oder gar am westlichen Stadtrand (E: 14.3°, F 14.9°). Der Tagesgang im Westen und Osten der Stadt ist annähernd gleich, wenn man von dem noch deutlich tieferen Minimum im Westen und der bis Mitternacht steileren Abkühlung im Osten absieht.

Innerhalb der einzelnen Stadtteile sind die Verhältnisse gegenüber der Wintersituation zum Teil verändert: Am Rathaus ist es jetzt durchweg geringfügig kälter als am Wetteramt. Bei noch relativ flach einfallender Strahlung liegt der Innenhof um die Station A lange im Schatten, während die freiere Lage des Wetteramts (B), die wohl die geringeren Wintertemperaturen verursacht, jetzt eine stärkere Aufheizung ermöglicht. Besonders charakteristisch für den eng verbauten Teil der Altstadt ist der abgeflachte Kurvenverlauf im Bereich des Maximums. – Auch bei den beiden östlichen Stationen sind die Verhältnisse gegenüber dem Winter vertauscht. An der am südexponierten Hang gelegenen Station D liegt die Temperatur während der ganzen Aufheizungsphase deutlich über der der Station C; das Maximum ist 1.1° höher.

Sommer (7. – 10.7.1972, Abb. 11): Entsprechend der größeren Tageslänge und der Witterungssituation bei einer hochsommerlichen Schönwetterperiode liegen die Extremwerte, verglichen mit Frühjahr und Herbst, zeitlich weiter auseinander und die Kurven sind im Scheitelbereich 'runder', weil etwa zwischen 12 und 18 Uhr die stündlichen Temperaturänderungen nur gering sind. Bezüglich der innerstädtischen Differenzierung treten aber wieder dieselben Erscheinungen auf: Paralleler, wenn auch zeitlich versetzter Tagesgang im West– und Ostteil der Stadt, verzögerte und langsamere Abkühlung in der Innenstadt, so daß die Maxima nur 1.5° (ohne Station E sogar nur 0.8°), die Minima dagegen 3.5° auseinanderliegen. Am frühen Nachmittag werden also überall in der Stadt annähernd gleiche Temperaturen angetroffen, egal ob es sich um die dicht oder locker verbaute Innenstadt, Gartengelände in Bebauungsnähe oder Wiesengelände am Stadtrand handelt. Die nächtliche Abkühlung ist weniger ausgeprägt als im Frühling oder Herbst, die Tagesamplituden sind geringer (A . . . F: 9.6, 8.5.; 10.7, 11.1: 10.5, 11.0° C) und entsprechend geringer ist auch der Unterschied zwischen den Amplituden in Innenstadt und Außenbezirken. Allerdings täuscht der steile Temperaturabfall am Abend darüber hinweg, daß um diese Zeit, und nicht etwa um die Zeit des Minimums, die größten Differenzen zwischen wärmster (Innenstadt–) und kältester (Freiland–) Station auftreten. Sie betragen 4.7° um 20 Uhr und 4.4° um 21 Uhr gegenüber 3.4° um 6 Uhr. Auffällig ist wiederum die geringere Temperatur von A gegenüber B, insbesondere nach 21 Uhr bis zum Minimum und das besonders steile Abfallen an den beiden östlichen Stationen nach 19.00 Uhr.

Herbst (21. – 24.10.1971, Abb. 12): Bei noch hohen Mittagstemperaturen aber schon starker nächtlicher Abkühlung und dementsprechend steilem Temperaturanstieg und –abfall sind hier durch stark differierende Amplitudenhöhe die thermischen Unterschiede zwischen den Stadtteilen besonders deutlich ausgeprägt. Ohne die Südhangstation D differieren die Maxima nur 1.3°, aber ab 18 Uhr kühlt die Innenstadt wesentlich langsamer ab, so daß sich bis 24 Uhr bereits ein Temperaturgegensatz zur zu dieser Zeit kältesten Station D von 4.5° entwickelt hat. Während sich im Osten die Temperaturabnahme nach 1 Uhr verlangsamt, hält sie an den Stationen E und F im Westen bis 6 Uhr unvermindert an. Die Amplitude ist hier mit 14.6° bzw. 15.0° entsprechend groß gegenüber der Innenstadt mit 9.8° (A) bzw. 11.4° (B). Deutlich tritt auch wieder die Sonderrolle der am südexponierten Steilhang gelegenen Station D in Erscheinung, deren Temperatur während der morgendlichen Aufheizungsphase der der übrigen Stationen voraus ist, das höchste Maximum erreicht, am Abend aber auch am schnellsten abnimmt.

Anhand der Stationsregistrierungen läßt sich für austauscharme Strahlungswetterlagen eine deutliche thermische W–E Differenzierung des Stadtgebiets feststellen: Östlich des Stadtzentrums im Dreisamtal große Tagesamplituden mit besonders schneller abendlicher Abkühlung, in der Innenstadt aufgrund der hohen Nachttemperaturen mit entsprechend geringer Amplitude insgesamt höchstes Temperaturniveau und am Westrand der Stadt im Übergangsbereich zur Rheinebene maximale Temperaturamplituden durch besonders niedrige Nachttemperaturen und geringste Minima.

Außerdem kommt in dieser Übersicht der Tagesgang der Differenz zwischen Innenstadt und Außenbezirken (Wärmeinsel) zum Ausdruck: Im Winter bleibt die Differenz während des ganzen Tages nahezu gleich. In den anderen Jahreszeiten ist sie während des morgendlichen Temperaturanstiegs durchweg gering, um die Zeit des Tagesmaximums im Sommer und Herbst z. T. gar nicht vorhanden; sie erreicht ihre größten Werte in den frühen Nachtstunden (Sommer) oder am frühen Morgen vor Sonnenaufgang (Frühling und Herbst).

4.2. Meßfahrten

4.2.1. Vorbemerkung

Tabelle 13 gibt einen Überblick über die durchgeführten Meßfahrten. Um Wiederholung zu vermeiden, wurden aus dieser Gesamtmasse 33 Meßfahrten ausgewählt, für die eine Isothermenkarte nach den in Abschnitt 2.2.4. geschilderten Grundsätzen hergestellt wurde. Bei der Auswahl waren die folgenden Gesichtspunkte maßgebend:

- Vergleichbare Meßfahrtroute und –dauer: Der Schwerpunkt liegt bei den umfangreichen Meßfahrten des Jahres 1973, die kürzeren und auf noch nicht standardisierter Route 1971/72 abgewickelten Meßfahrten wurden nur im Ausnahmefall berücksichtigt.
- Meßtechnische Korrektheit: Meßfahrten, bei denen nachträglich eine Dejustierung der Apparatur oder sonstige instrumentelle Fehler festzustellen waren, wurden nicht verwendet.
- Homogene Wetterbedingungen: Trat während einer Meßfahrt eine Wetteränderung ein (z. B. einsetzender Niederschlag, Bewölkungsaufzug) wurde die entsprechende Aufzeichnung nicht verwendet.
- Aufeinanderfolge mehrerer Meßfahrten: Zeitlich aufeinanderfolgende Meßfahrten (z. B. Abend – Morgen – Abend des folgendes Tages) wurden bevorzugt, um neben der räumlichen Differenzierung in einigen Fällen auch die zeitliche Wandlung der Wärmeinsel zu dokumentieren.
- Mindestintensität der Wärmeinsel: Isanomalenkarten wurden nur von Meßfahrtaufzeichnungen angefertigt, die mindestens 3° C Temperaturdifferenz zwischen Stadt und Freiland aufwiesen.

Tabelle 13:

Verzeichnis der Meßfahrten
(Druchführungszeit, Temperaturkennwerte, Daten zur meteorologischen Situation)

Erläuterungen

Die Spalten der Tabelle sind numeriert. Entsprechend dieser Numerierung wird im folgenden der Inhalt kurz erläutert, soweit die Angaben in der Kopfzeile dazu nicht genügen.

Spalte

1 Laufende Numerierung der Meßfahrten in chronologischer Folge.

4 Zeit des Eintreffens am Bezugspunkt 'Betzenhausen' (Station E, vgl. Tab. 11). Gleichzeitig Zeitpunkt, auf den die Meßwerte einer Fahrt graphisch reduziert wurden.

5 Mit dem Meßfahrzeug am Bezugspunkg 'Betzenhausen' gemessene Lufttemperatur in 2 m Höhe. Gleichzeitig Nullwert der Isanomalenkarten.
Bei einigen Fahrten wurde der Bezugspunkt nicht angefahren, in Sp. 4 u. 5 steht dann *. Für die Meßfahrten Nr. 31 und 32 wurde ein anderer Bezugspunkt zugrunde gelegt (Flugplatz).

6 Höchste und tiefste während einer Meßfahrt gemessene korrigierte Lufttemperatur.

7 Wärmeinselintensität im Sinne von OKE (1973) ald Differenz zwischen maximaler Stadt- und minimaler Freiland-Lufttemperatur.

8a Großwetterlage in der im Dt. Wetterdienst üblichen Klassifikation nach P. HESS und H. BREZOWSKY (1952).
[Großbuchstaben bezeichnen die Richtung der Höhenströmung (N, NW, W, SW, S, SE, NE), die Lage eines Höhenhochs (HN, HB, HF, HNF, HM, BM, Ww) bzw. eines Höhentiefs oder -troges (TM, TB / TrM, TrW) über verschiedenen Teilen West-, Mittel- und Nordeuropas. Kleinbuchstaben dienen der zusätzlichen Kennzeichnung zyklonaler (z) und antizyklonaler (a) Lagen.]
Genaue Aufschlüsselung bei HESS u. BREZOWSKY 1952, S. 5 – 12 bzw. 2. Aufl. 1969, S. 4 – 11.

8b Luftmasse nach der auf SCHERHAG (1948, S. 145 – 150) zurückgehenden Einteilung.
[Die Buchstabenkombination kennzeichnet kontinentale (c) bzw. maritime (m) Tropik- (T) oder Polarluft (P). Der als Index aufzufassende 3. Buchstabe deutet Beeinflussung durch Tropik- (t) bzw. Polarluft (p) an oder bezeichnet das Herkunftsgebiet genauer (a: Arktis).]

Die Daten für die Spalten 8a/8b werden vom Dt. Wetterdienst regelmäßig veröffentlicht (Die Großwetterlagen Europas, 24. Jahrgang, Offenbach 1971 ff.).

8c Dezimalklassifikation des Wettergeschehens nach KUHNKE u. KLEIN (1969).
[Die Klassifikation enthält außer der Großwetterlage (1. Zahl) und den 'Luftkörpern' in zwei Niveaus (4. u. 5. Zahl) auch Angaben zu den Wettervorgängen (2. Zahl) und zur Dynamik der Atmosphäre (3. Zahl). Im einzelnen bedeuten:

x–––– (Großwetterlage)

1 Antizyklonale WL mit advekt. Vorgängen: Tropikluft i. d. Höhe
2 Antizyklonale WL mit advekt. Vorgängen: Polarluft i. bodennahen Schichten
3 Antizyklonale WL ohne advekt. Vorgängen:
4 Meridionale WL, tropischer Typ
5 Meridionale WL, polarer Typ
6 Zonale WL: West–WL, tropische Tropopause, langsamer Typ
7 Zonale WL: West–WL, tropische Tropopause, schneller Typ
8 Zonale WL: West–WL, polarer Tropopause
9 Zonale WL: Ost–WL

–x––– (Wettervorgänge)

0 keine bes. Vorgänge	5 Labiles Aufgleiten
1 Absinken	6 Labile Vorgänge (Turbulenz)
2 Abgleiten	7 Abgleiten und labile Vorgänge
3 Aufgleiten über 6000 m	8 Abgleiten über Aufgleiten
4 Aufgleiten	9 Aufgleiten und labile Vorgänge

––x–– (Dynamik d. Atmosphäre)

0 keine Angabe
3 Frontalzone, stark, warme Seite
4 Frontalzone, schwach, warme Seite
5 Frontalzone, stark, mittl. Frontalzonenbereich
6 Frontalzone, schwach, mittl. Frontalzonenbereich
7 Frontalzone, stark, kalte Seite
8 Frontalzone, schwach, kalte Seite

–––x– und ––––x (unter und oberer Luftkörper)

0 mTs	3 mPt	
1 mT	4 mP	
2 mTp	5 mPa	(vgl. oben 8b)]

Die Klassifikation wird von der Medizinmeteorologischen Forschungsstelle Freiburg des DWD täglich für 0 Uhr und 12 Uhr durchgeführt. In die Tab. wurde der zur jeweiligen Meßfahrt nächstgelegene Termin aufgenommen, bei etwa gleichem zeitlichem Abstand der frühere.

9 – 11 Alle Daten nach den 'Synoptischen Tagebüchern' des Wetteramts Freiburg (Stefan-Meier-Str. 4, 269 m NN). Mehrere Ablesungen während einer Meßfahrt (Sp. 9 und 10) durch Schrägstrich getrennt, in Sp. 11 nur die frühere von ggf. mehreren Beobachtungen übernommen.

10 Windrichtungsangaben nach der 32-teiligen Windrose:

02	NNE	10	ESE	18	SSW	26	WNW	
04	NE	12	SE	20	SW	28	NW	
06	ENE	14	SSE	22	WSW	30	NNW	
08	E	16	S	24	W	32	N	C = Calme

11a Gesamtbewölkung in Achtel, – = wolkenlos und <1/8 Ci

11b Wolkenuntergrenze in [m], bei Beobachtungen für mehrere Wolkenstockwerke nur die des untersten. Keine Angabe bei Ci.

11c Angaben der Wolkengattung und -art, ausnahmsweise auch -unterart, für das jeweils tiefste Wolkenstockwerk. Setzt sich eine hohe Gesamtbewölkung zu etwa gleichen Teilen aus verschiedenen Wolkengattungen zusammen, sind – durch Komma getrennt – nur die Gattungen angegeben.
Aufschlüsselung der Abkürzungen z. B. in DWD 1971, S. 54 – 63.

Tabelle 13:
Verzeichnis der Meßfahrten
(Durchführungszeit, Temperaturkennwerte, Daten zur meteorologischen Situation)

Erläuterungen
Die Spalten der Tabelle sind numeriert. Entsprechend dieser Numerierung wird im folgenden der Inhalt kurz erläutert, soweit die Angaben in der Kopfzeile dazu nicht genügen.

Spalte

1 Laufende Numerierung der Meßfahrten in chronologischer Folge.

4 Zeit des Eintreffens am Bezugspunkt 'Betzenhausen' (Station E, vgl. Tab. 11). Gleichzeitig Zeitpunkt, auf den die Meßwerte einer Fahrt graphisch reduziert wurden.

5 Mit dem Meßfahrzeug am Bezugspunkt 'Betzenhausen' gemessene Lufttemperatur in 2 m Höhe. Gleichzeitig Nullwert der Isanomalenkarten.
Bei einigen Fahrten wurde der Bezugspunkt nicht angefahren, in Sp. 4 u. 5 steht dann *. Für die Meßfahrten Nr. 31 u. 32 wurde ein anderer Bezugspunkt zugrunde gelegt (Flugplatz).

6 Höchste und tiefste während einer Meßfahrt gemessene korrigierte Lufttemperatur.

7 Wärmeinselintensität im Sinne von OKE (1973) als Differenz zwischen maximaler Stadt- und minimaler Freiland-Lufttemperatur.

8 a Großwetterlage in der im Dt. Wetterdienst üblichen Klassifikation nach P. HESS u. H. BREZOWSKY (1952).
[Großbuchstaben bezeichnen die Richtung der Höhenströmung (N, NW, W, SW, S, SE, NE), die Lage eines Höhenhochs (HN, HB, HF, HNF, HM, BM, Ww) bzw. eines Höhentiefs oder -troges (TM, TB / TrM, TrW) über verschiedenen Teilen West-, Mittel- und Nordeuropas. Kleinbuchstaben dienen der zusätzlichen Kennzeichnung zyklonaler (z) und antizyklonaler (a) Lagen.]
Genaue Aufschlüsselung bei HESS u. BREZOWSKY 1952, S. 5 - 12 bzw. 2. Aufl. 1969, S. 4 - 11.

8 b Luftmasse nach der auf SCHERHAG (1948, S. 145 - 150) zurückgehenden Einteilung.
[Die Buchstabenkombination kennzeichnet kontinentale (c) bzw. maritime (m) Tropik- (T) oder Polarluft (P). Der als Index aufzufassende 3. Buchstabe deutet Beeinflussung durch Tropik- (t) bzw. Polarluft (p) an oder bezeichnet das Herkunftsgebiet genauer (a: Arktis).]
Die Daten für die Spalten 8a/8b werden vom Dt. Wetterdienst regelmäßig veröffentlicht (Die Großwetterlagen Europas, 24. Jahrgang, Offenbach 1971 ff.).

8 c Dezimalklassifikation des Wettergeschehens nach KUHNKE u. KLEIN (1969).
[Die Klassifikation enthält außer der Großwetterlage (1. Zahl) und den 'Luftkörpern' in zwei Niveaus (4. u. 5. Zahl) auch Angaben zu den Wettervorgängen (2. Zahl) und zur Dynamik der Atmosphäre (3. Zahl). Im einzelnen bedeuten:

x – – – – (Großwetterlage)
1 Antizyklonale WL mit advekt. Vorgängen: Tropikluft i. d. Höhe
2 " " " " " : Polarluft i. bodennahen Schichten
3 " " ohne " "

4 Meridionale WL, tropischer Typ
5 Meridionale WL, polarer Typ
6 Zonale WL: West-WL, tropische Tropopause, langsamer Typ
7 " ": " , " " , schneller Typ
8 " ": " , polare Tropenpause
9 " ": Ost-WL

– x – – – (Wettervorgänge)

0 keine bes. Vorgänge	5 Labiles Aufgleiten
1 Absinken	6 Labile Vorgänge (Turbulenz)
2 Abgleiten	7 Abgleiten und labile Vorgänge
3 Aufgleiten über 6000 m	8 Abgleiten über Aufgleiten
4 Aufgleiten	9 Aufgleiten und labile Vorgänge

– – x – – (Dynamik d. Atmosphäre)
0 keine Angabe
3 Frontalzone, stark, warme Seite
4 " , schwach, "
5 " , stark, mittl. Frontalzonenbereich
6 " , schwach, " "
7 " , stark, kalte Seite
8 " , schwach, kalte Seite

– – – x – und – – – – x (unterer und oberer Luftkörper)

0	mTs	3	mPt
1	mT	4	mP
2	mTp	5	mPa

(vgl. oben 8 b)]

Die Klassifikation wird von der Medizinmeteorologischen Forschungsstelle Freiburg des DWD täglich für 0 Uhr und 12 Uhr durchgeführt. In die Tab. wurde der zur jeweiligen Meßfahrt nächstgelegene Termin aufgenommen, bei etwa gleichem zeitlichem Abstand der frühere.

9 - 11 Alle Daten nach den 'Synoptischen Tagebüchern' des Wetteramts Freiburg (Stefan-Meier-Str. 4, 269 m NN). Mehrere Ablesungen während einer Meßfahrt (Sp. 9 u. 10) durch Schrägstrich getrennt, in Sp. 11 nur die frühere von ggf. mehreren Beobachtungen übernommen.

10 Windrichtungsangaben nach der 32-teiligen Windrose:

02	NNE	10	ESE	18	SSW	26	WNW
04	NE	12	SE	20	SW	28	NW
06	ENE	14	SSE	22	WSW	30	NNW
08	E	16	S	24	W	32	N

11 a Gesamtbevölkerung in Achtel, – ≙ wolkenlos und < 1/8 Ci

11 b Wolkenuntergrenze in [m], bei Beobachtungen für mehrere Wolkenstockwerke nur die des untersten. Keine Angabe bei Ci.

11 c Angabe der Wolkengattung und -art, ausnahmsweise auch -unterart, für das jeweils tiefste Wolkenstockwerk. Setzt sich eine hohe Gesamtbevölkerung zu etwa gleichen Teilen aus verschiedenen Wolkengattungen zusammen, sind -durch Komma getrennt- nur die Gattungen angegeben. Aufschlüsselung der Abkürzungen z. B. in DWD 1971, S. 54 - 63.

Tabelle 13: Verzeichnis der Meßfahrten

(Durchführungszeit, Temperaturkennwerte, Daten zur meteorologischen Situation)

Angaben zur Durchführungszeit				Temperaturkennwerte [°C]				Meteorologische Situation während der Meßfahrt (Spalte 8c - 11 gültig für Wetteramt Freiburg, nach Unterlagen des DWD)									
1 Nr.	2 Datum	3 Beginn/Ende der Meßfahrt	4 Zeit am Bezugspunkt	5 Temperatur am Bezugspunkt (Nullwert)	6 T_{max}	T_{min}	7 WI-Intens. $T_{max}-T_{min}$	8 Wetterlage (a)	(b)	(c)	9 Lufttemperatur [°C]	Luftfeuchte [%]	10 Windrichtg.	Windgeschw. [m/sec]	11 Bewölkung (a)	(b)	(c)
1	12.10.71	21.33 - 22.33	22.16	13.8	16.4	11.8	4.4	Wa	cTp	56666	16.4/16.5	66/69	12/12	4.3/4.3	2	1300	Sc str
2	29.10.71	6.58 - 7.55	7.38	- 0.2	3.8	-1.7	5.5	HM	mPt	91658	2.0	82	10	2.5	1	--	Ci fib
3	30.10.71	6.19 - 7.47	7.14	- 0.3	5.2	-0.6	5.8	HM	cTp	98658	3.9/ 4.1	93/91	C	C	4	2400	Ac str
4	2.11.71	14.23 - 15.40	15.25	11.3	12.8	8.4	4.4	HM	cTp	21586	12.5/12.1	58/57	32/02	1.8/2.1	5	--	Ci fib
5	3.11.71	6.00 - 7.14	6.36	0.2	4.0	-1.0	5.0	HM	cTp	21068	3.9	92	12	0.7	2	--	Ci fib
6	3.11.71	12.25 - 13.25	13.00	11.8	12.1	10.3	1.8	HM	cTp	21466	10.6/11.9	73/68	24/22	1.8/1.8	5	--	Ci fib
7	5.11.71	18.35 - 19.55	19.06	12.4	13.4	5.3	8.1	Wz	mTp	41386	13.0/12.0	50/52	16/14	3.6/2.7	-	--	--
8	5.11.71	21.05 - 22.28	*	*	15.2	5.4	9.8	Wz	mTp	44586	11.9/15.2	50/40	20/20	3.8/6.1	-	--	--
9	6.11.71	6.06 - 7.40	*	*	14.0	6.7	7.3	Wz	mTp	44586	12.4/11.7	44/54	22/20	3.6/2.6	3	1200	Sc str
10	15.12.71	6.04 - 7.48	7.00	- 1.5	3.9	-6.1	10.0	SWa	mTp	11436	3.2/ 2.6	53/55	12/12	1.2/1.2	-	--	--
11	6. 1.72	6.07 - 7.47	6.57	- 3.2	-0.7	-4.4	3.7	SEz	cPt	38864	-0.6/-1.4	79/83	16/16	2.7/1.4	3	3000	Ac fib
12	8. 1.72	6.10 - 7.57	7.32	- 2.0	-1.8	-2.2	0.4	SEz	cPt	38864	-1.8/-1.7	97/99	C /12	C /0.9		(Nebel)	
13	22. 1.72	6.05 - 7.30	7.00	- 1.2	3.9	-4.0	7.9	BM	mPt	54444	0.4/ 0.4	97/97	30/30	1.7/1.7	8	240	Sc neb
14	22. 2.72	11.55 - 12.55	12.40	6.6	7.7	5.5	2.2	SEz	cPt	28074	5.9	76	28	1.9	1	3000	Ac cas
15	3. 3.72	6.15 - 7.55	7.08	- 0.2	2.2	-4.2	6.4	Ww	cPt	41478	1.8/ 1.8	71/76	12/16	0.9/0.7	-	--	--
16	3. 3.72	11.40 - 13.00	12.22	8.0	8.9	6.8	2.1	Ww	cPt	44468	7.7	66	24	1.3	7	--	Ci fib
17	9. 3.72	6.18 - 7.50	6.58	0.0	5.4	-2.6	8.0	TrW	mTp	44888	5.2/ 3.6	83/85	10/10	4.5/1.0	3	1300	Sc str
18	9. 3.72	18.35 - 19.55	19.13	7.6	11.1	5.9	5.2	TrW	mTp	44888	9.8/ 9.3	65/69	32/14	0.7/1.0	8	2400	Ac, Cs
19	16. 3.72	19.15 - 20.50	20.00	10.2	12.9	5.6	7.3	SEa	cPt	11430	12.7/11.9	54/60	12/10	2.6/2.7	1	--	Ci fib
20	17. 3.72	5.30 - 7.10	6.01	1.8	6.0	-1.8	7.8	SEa	cPt	31440	6.6/ 5.5	77/85	12/ C	0.8/ C	-	--	--
21	23. 3.72	19.43 - 21.02	20.15	11.7	14.4	6.2	8.2	HB	cTp	31366	13.5/12.5	43/47	12/12	1.2/2.1	-	--	--

23	31. 5.72	4.05 - 5.07	4.33	11.2	12.3	9.0	3.3	Wz	mPt	77544	12.1	66	16	2.0	6	1000	Cu, Ac
24	22. 6.72	13.03 - 14.39	13.44	23.7	25.6	22.7	2.9	Wz	mPt	13346	23.0/24.1	38/37	20/20	7.6/7.7	1	1400	Cu hum
25	23. 6.72	3.11 - 4.09	3.42	16.4	17.4	15.8	1.6	Wz	mPt	79300	17.2	72	20	8.6	8	1100	Sc, As
26	26. 6.72	13.07 - 14.24	13.45	26.0	27.6	24.4	3.2	HM	mP	31440	26.0	40	28	2.7	7	--	Ci fib
27	31. 8.72	4.58 - 6.00	5.27	9.6	12.2	6.2	6.0	NEa	cP	91034	11.3	84	32	2.7	-	--	--
28	3.10.72	19.00 - 20.50	19.54	11.0	11.9	6.5	5.4	HFa	cPt	31046	12.4/11.8	48/52	08/06	6.5/5.1	-	--	--
29	4.10.72	5.05 - 6.30	5.40	-0.2	7.0	-0.2	7.2	HFa	cPt	91408	6.8/ 3.8	62/79	06/24	2.9/2.1	-	--	--
30	5.10.72	5.00 - 6.20	5.59	0.6	2.8	-1.1	3.9	HM	cPt	11446	3.0/ 2.9	68/71	C	C	-	--	--
31	5.10.72	13.00 - 14.20	13.40	14.7	15.4	13.2	2.2	HM	cPt	11446	12.8/15.6	50/42	28/28	2.1/2.1	2	3000	Ac len
32	5.10.72	18.20 - 19.30	19.00	15.4	16.0	6.4	8.8	HM	cPt	11446	14.8	45	08	4.3	2	3000	Ac len
33	6.10.72	18.30 - 20.20	19.38	8.0	11.5	6.4	5.1	HM	cPt	11440	14.2/11.6	61/71	30/16	1.0/2.1	2	--	Ci fib
34	7.10.72	4.56 - 6.42	6.11	4.0	8.1	2.2	5.9	HM	cPt	11440	6.6/ 6.7	80/85	12/ C	0.8/ C	1	3000	Ac len
35	7.10.72	18.31 - 19.56	19.13	11.4	14.8	8.0	6.8	HM	cPt	11440	14.4/13.4	55/62	16/12	1.2/2.5	2	--	Ci fib
36	8.10.72	18.37 - 20.07	*	*	14.8	8.7	6.1	HM	cPt	11460	15.3/13.2	58/66	14/12	1.7/2.5	-	--	--
37	10.10.72	18.30 - 20.03	19.19	9.1	14.2	7.2	7.0	SEa	cPt	43004	13.2/11.6	80/85	04/32	1.2/0.9	7	2700	Ac len
38	12.10.72	4.55 - 6.30	6.00	7.8	10.2	7.5	2.7	HB	cPt	48445	9.7/ 9.8	90/91	08/04	1.1/1.4	8	3000	As op
39	17.10.72	19.02 - 20.30	19.47	2.0	9.6	2.5	7.1	HB	mTp	31033	8.0/ 6.1	84/89	C	C	1	--	Ci fib
40	17.10.72	23.10 - 0.36	0.07	-2.0	3.5	-2.4	5.9	HB	mTp	31045	5.9	93	C	C	1	--	Ci fib
41	18.10.72	5.00 - 6.33	6.05	3.4	6.2	0.7	5.5	HB	mTp	31045	3.6/ 2.7	97/97	C /02	C /1.6		(Nebel)	
42	2. 1.73	18.32 - 20.13	19.30	-2.8	-0.9	-4.5	3.6	BM	cPt	93655	-1.5/-1.4	81/83	02/32	1.4/1.2	5	3000	Ac str
43	3. 1.73	6.32 - 8.04	7.45	-5.8	-2.9	-6.2	3.3	BM	cPt	93675	-4.5/-4.3	92/90	24/22	0.9/1.3	8	--	Cs neb
44	8. 1.73	19.45 - 21.14	20.39	-1.7	-0.5	-2.5	2.0	HB	mTp	21058	-1.8	97	30	1.0		(Nebel)	
45	9. 1.73	5.20 - 7.02	6.10	-0.7	0.3	-1.2	1.5	HB	mTp	21058	-1.4/-1.8	97/90	32/32	1.6/1.5		(Nebel)	
46	22. 1.73	19.20 - 21.10	20.17	0.0	1.9	-1.7	3.6	Ww	cPt	21034	1.7/ 1.5	92/93	32/10	0.3/0.7	3	2700	Ac pe
47	23. 1.73	5.40 - 7.30	6.28	-2.1	-1.0	-5.4	4.4	BM	mPt	21034	-1.0/-1.1	81/81	10/12	1.5/1.4	6	3000	Ac, Ci
48	29. 1.73	19.16 - 21.00	20.11	5.0	6.0	4.0	2.0	NWz	mPt	64344	5.2/ 5.2	78/80	18/20	4.7/5.9	8	1000	Sc, As
49	30. 1.73	5.50 - 7.33	6.41	5.4	5.5	1.8	3.7	NWz	mPt	64344	5.0/ 5.2	87/87	16/14	1.8/1.2	8	1100	Sc str
50	5. 2.73	19.15 - 21.02	20.11	-1.1	3.3	-3.5	6.8	HM	cTp	21344	1.9/1.7	84/86	12/18	0.9/1.2	-	--	--
51	27. 2.73	4.23 - 6.03	5.18	-1.8	0.5	-2.8	3.3	TrM	mPa	54760	-1.3/-1.2	93/92	28/32	0.5/0.9	8	900	Sc str
52	1. 3.73	19.17 - 21.48	20.47	2.0	4.4	-2.0	6.4	Wa	mPa	64444	3.0/ 2.9	69/69	08/12	2.1/3.4	-	--	--
53	2. 3.73	6.10 - 7.25	7.00	3.8	6.3	3.2	3.1	Wa	mTp	64444	4.8/ 3.9	61/72	22/18	3.4/4.0	8	1500	Sc, As

Um Eigenart und Menge des bei den Meßfahrten gewonnenen Materials gerecht zu werden, ist die folgende Darstellung in vier Einzelabschnitte gegliedert:

- Synopsis aller Isanomalenkarten für den Morgen– bzw. Abendtermin (4.2.2.)
- Einzelanalyse der Isanomalenkarten (4.2.3.)
- Ausscheiden unterschiedlicher Wärmeinseltypen nach verschiedenen Gliederungsgesichtspunkten (4.2.4.)
- Besprechung von Einzelfällen (4.2.5.)

Die Gründe für dieses Vorgehen sind die folgenden:
Die Mehrzahl der bisherigen Arbeiten, die städtische Wärmeinseln nach Meßfahrtergebnissen beschreiben, basiert auf einigen wenigen Meßfahrten (vgl. Tab. 10). Diese Autoren müssen sich deshalb zwangsläufig auf den hier an 4. Stelle aufgeführten Punkt beschränken: Sie stellen einige konkrete Einzelfälle von Wärmeinselbeobachtungen dar, die sich in ihren Randbedingungen (z. B. Wetterlage, Jahreszeit) unterscheiden. Bei der Diskussion wird dann i. d. R. von der unausgesprochenen Annahme ausgegangen, daß die Stichproben für die jeweiligen Randbedingungen *typische* Fälle repräsentieren, mithin generalisierende Verallgemeinerungen auf der Basis weniger Meßfahrten zulässig sind. Ein Ziel dieser Untersuchung ist es, die Berechtigung dieser Auffassung anhand umfassenderen Materials zu prüfen.

Das andere Extrem möglichen Vorgehens, die Isolierung von Typen nach den Regeln der Statistik, würde andererseits einen so immensen Meßaufwand erfordern, daß dieser Ansatz aus praktischen Gründen nicht in Frage kommt. Außerdem sagt das hier am ehesten in Frage kommende statistische Hilfsmittel, die Berechnung von Korrelationskoeffizienten (z. B. zwischen den Merkmalen Wärmeinselintensität und Wetterlagentyp oder Wärmeinselintensität und Strahlungsbilanz usw.) bekanntlich nichts über evtl. kausale Zusammenhänge.[26] Ausser den praktischen Gründen spricht gegen dieses Verfahren auch die Tatsache, daß es wenig förderlich ist, als ersten Schritt einer Analyse zahlreiche Einzelbeobachtungen zu einem 'Typ' zu kondensieren. Dabei geht viel Detailinformation verloren. Zwischen diesen beiden Positionen – Einzelfälle werden implizit als Typ interpretiert und Typenbildung mittels statistischer Analyse – bleibt der hier gewählte Weg, bei dem rechnerische Behandlung nicht angewendet werden kann, die Zahl der zugrundeliegenden Meßfahrten aber so groß ist, daß die implizite Gleichsetzung von Einzelfall und typischer Situation vermieden wird. Die Gefahr dabei ist lediglich, daß die Strukturierung des Materials aufgrund des Fehlens statistischer Klassifizierungsmerkmale nicht als Ergebnis der Analyse erscheint, sondern nach irgendwelchen als relevant angesehenen Gruppierungen von Randbedingungen vorweg vorgenommen wird, praktisch also zur Voraussetzung der Analyse wird. Damit ist aber eine Interpretation der Bedeutung einzelner Randbedingungungen sinnlos.

Deshalb soll zunächst eine allgemeine Synopsis der Isanomalenkarten versucht werden, gewissermaßen eine unbefangene Sichtung des Materials unter bewußter Ausschaltung der Kenntnis der bei den einzelnen Meßfahrten herrschenden Bedingungen. Die dabei auftretenden – oder fehlenden – Strukturen im Bild der Isolinien geben einen ersten Hinweis auf vorhandene Regelmäßigkeiten der Temperaturverteilung, insbesondere auf solche, die bei *allen* Meßfahrten in ähnlicher Form auftreten. Damit lassen sich Einflüsse der zeitlich invarianten Randbedingungen – wie z. B. Topographie, Bebauung, Vegetationsverteilung – isolieren. Demselben Ziel dient die anschließende Einzelanalyse der Isanomalenkarten.

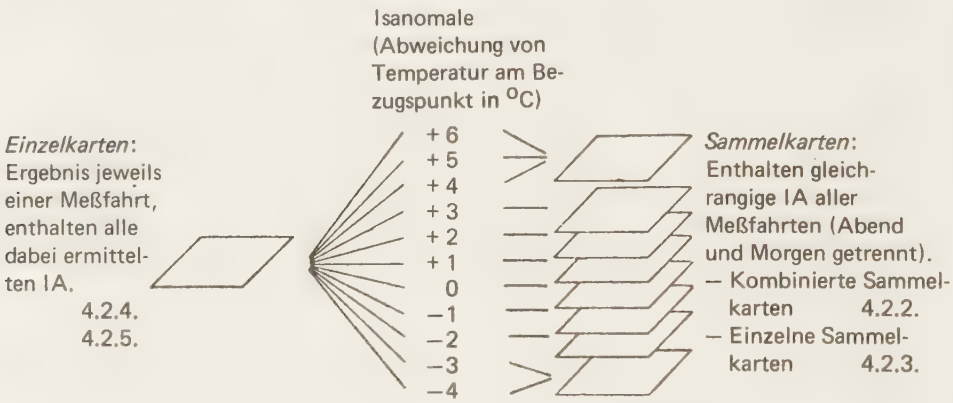
Erst in einem weiteren Schritt werden dann die auf der Wirkung kurzfristig variabler Randbedingungen – Wetterlage im weitesten Sinne – beruhenden feineren Differenzierungen der Wärmeinselkonfiguration untersucht. Auch dabei erscheint es sinnvoller, von der Gestalt der beobachteten Isanomalen ausgehend eine Gruppenbildung durchzuführen und die dabei auftretenden Randbedingungen zu untersuchen, als umgekehrt zu verfahren. Auf dieser Basis wird dann die Gruppierung zu Wärmeinseltypen versucht.

Schließlich bleibt noch die Interpretation konkreter Einzelfälle, bei der dann stärker als bei der vorangegangenen generalisierenden Betrachtung auf Details eingegangen werden kann.

Abschließend soll noch die Art der Präsentation der Isanomalenkarten (im folgenden nur noch: IA–Karten) erläutert werden.

Jede *Einzelkarte für einen Meßfahrttermin* enthält alle Linien gleicher Abweichung von der in 2 m Höhe gemessenen Lufttemperatur am Bezugspunkt 'Station E, Betzenhausen' mit einer Stufung von ganzen °C. Solche Karten werden in den Abschnitten 4.2.4 und 4.2.5. angeführt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die ursprünglich eingezeichneten t_p–Werte z. T. weggelassen. – Für den Abschnitt 4.2.2. und 4.2.3. wurden dagegen Karten gezeichnet, die jeweils gleichrangige Isanomalen aller Meßfahrttermine am Abend bzw. am Morgen enthalten (sog. *IA–Sammelkarten).* Von den insgesamt erforderlichen 11 Stufen (+6° bis –4°) wurde für die Werte –2°, –1°, 0°, +1°, +2° jeweils eine eigene Karte angelegt, die tiefen (–3°, –4°) und die hohen (+3°. . . +6°) Werte wurden jeweils zusammengefaßt, da sie nicht mehr bei allen Meßfahrten auftreten. Abb. 13 gibt einen Überblick über die zur Verfügung stehenden IA–Karten.

Abb. 13: Gruppierung der Isanomalenkarten



Der Originalarbeit sind die Karten 2 –15 als Transparentfolien beigegeben. Aus technischen Gründen ist dies hier nicht möglich. Trotzdem wurde der Textabschnitt 4.2.2., der sich auf die hier nicht reproduzierbare Kombination mehrerer Folien bezieht, unverändert übernommen.

4.2.2. Synopsis der Isanomalenkarten

Abend, +6° . . . –4° (Karten 2 – 8)

Das Liniengewirr, das bei gleichzeitiger Betrachtung aller IA–Sammelkarten entsteht, ist nur auf den ersten Blick völlig regellos. Es lassen sich herausstellen:
– Gebiete mit enger Scharung mehr oder weniger gleich gerichteter Isanomalen (IA).

Am deutlichsten ist das der Fall in einer Zone, die vom Südende des Flugplatzes in nordwestlicher Richtung etwa parallel zur Eisenbahn Freiburg/Breisach verläuft und die Stadtteile Betzenhausen und Landwasser auf ihrer NE–Seite einfaßt. Ebenfalls deutlich östlich der Innenstadt in einer Zone, die an der Spitze des Schloßberges beginnt und nach N der Grenzlinie Innenstadt/Schloßberg folgt, sich in Herdern aber in zwei weniger ausgeprägte Äste gabelt. In nicht ganz so klarer Ausprägung zeigt sich diese Anordnung auch an der Ostseite des Flugplatzes an der Grenzlinie Flugplatz/Industriegebiet, im Süden der Innenstadt im Bereich zwischen Mittelwiehre und Sternwald (W–E streichend) und in einem geschwungenen Linienzug, der den neuen Stadtteil Weingarten nach W begrenzt.

— Gebiete mit mittlerer IA—Dichte ohne erkennbare Richtungsbevorzugung der IA.
Dazu gehören westlich der Innenstadt der Bereich Stühlinger/Klinikum und weiter westlich der Stadtteil Bischofslinde, im SW der Bereich St. Georgen/Industriegebiet Süd und südlich der Innenstadt Unter— und Mittelwiehre. Ebenfalls ohne Richtungsbevorzugung, wenn auch von insgesamt geringerer Dichte, ist der Linienverlauf im Übergangsgebiet zwischen Betzenhausen/Lehen/Landwasser und in der Oberwiehre.
— Gebiete mit sehr geringer IA—Dichte.
Am stärksten fällt dies im Bereich südlich der Dreisam und westlich der Güterbahn in den Stadtteilen Weingarten/Haslach ins Auge. Weiterhin zwischen Bischofslinde und Betzenhausen (Baggersee), aber auch unmittelbar nördlich der Innenstadt östlich der Hauptbahnlinie (zwischen Institutsviertel und Kompturplatz) und in einem schmalen Streifen, der unmittelbar südlich der Innenstadt entlang der Dreisam in W—E—Richtung verläuft.
— Kleine ringförmige IA;Strukturen.
Solche Strukturen sind besonders auffällig in der Innenstadt, nordwestlich anschließend daran (Bereich Breisacher Straße) in Haslach, St. Georgen und Weingarten, in der Oberwiehre und im Industriegebiet Nord.

Was sagt diese Anordnung der IA?
Dichte Linienscharung bedeutet, daß hier immer wieder auf engem Raum thermische Gegensätze angetroffen werden, d. h. ein relativ großer horizontaler Temperaturgradient mit großer Häufigkeit auftritt.[27] Darin kommen v. a. die zeitlich nicht variablen unter den thermisch wirksamen Einflußfaktoren zum Ausdruck: In erster Linie sind dies markante Wechsel im Relief oder in der Geländenutzung (z. B. an der Grenzlinie dichter Bebauung gegen Freiland). Die Zusammenfassung aller Einzelkarten zeigt damit Gebiete auf, die unabhängig von den individuellen Bedingungen des Einzelfalls die Grenze der städtischen Wärmeinsel markieren.

Auch die Flächen mit sehr *geringer Dichte von IA,* sofern sie innerhalb des regelmäßig erfaßten Bereichs liegen, zeigen eine Konstanz thermischer Bedingungen an: Das Fehlen oder seltene Vorkommen der IA besagt, daß hier immer wieder über größere Flächen homogene thermische Verhältnisse angetroffen werden, die sich außerdem durch eine gleichbleibende Differenz gegenüber dem Bezugspunkt (Station E) auszeichnen.

Demgegenüber besagt *mittlere IA—Dichte ohne Bevorzugung einer Linienrichtung,* daß hier horizontale Temperaturgradienten zwar auftreten, in ihrer Intensität, Richtung und Lage innerhalb des betrachteten Gebiets aber nicht stabil fixiert sind. Von Fall zu Fall werden im gleichen Stadtbereich völlig unterschiedliche Situationen erfaßt, was nur als Effekt zeitlich variabler Randbedingungen aufgefaßt werden kann.

Die *ringförmigen Strukturen* markieren isolierte Areale von geringer Ausdehnung innerhalb des Stadtgebietes, die allseits von kälteren oder wärmeren Flächen umgeben sind. Man kann sie als in die Wärmeinsel der Stadt eingelagerte sekundäre Wärmeinsel bzw. als Kälteseen bezeichnen. Bei ihrer Beurteilung muß berücksichtigt werden, daß insbesondere bei schwachem horizontalem Temperaturgradient der Durchmesser des in der Karte erscheinenden Rngs wesentlich vom — zufälligen — absoluten Wert der Abweichung vom Referenzpunkt abhängt, da der vorgegebene 1° — Abstand der einzelnen IA groß ist im Vergleich zu den Differenzen zwischen solchen sekundären Wärmeinseln und ihrer Umgebung.

Als Ergebnis der gleichzeitigen Betrachtung aller IA — Sammelkarten des Abendtermins kann festgehalten werden:

a) — Östlich der Innenstadt entlang des Schloßberghanges und südlich an der Grenze des Stadtteils Wiehre gegen den Sternwald ist mit großer Häufigkeit ein starker horizontaler Temperaturgradient anzutreffen. Hier stoßen dichtbebaute Stadtteile unmittelbar an steil aufsteigendes Waldgelände.

– Noch markanter ist eine von der Südspitze des Flugplatzes nach NW ziehende Zone häufiger horizontaler Temperaturgradienten. Hier ist das Relief homogen, der thermische Gegensatz also v. a. auf die Nachbarschaft ausgedehnter Wald– bzw. Wiesenflächen und städtischer Bebauung zurückzuführen.
– Aufschlußreich – und für die weitere Interpretation bedeutungsvoll – ist auch das Fehlen häufiger horizontaler Temperaturgradienten, wo man sie zunächst vermuten würde. Der nördliche (Industriegebiet Nord, Zähringen), westliche (Haid), südwestliche (St. Georgen) und östliche (Littenweiler/Waldsee) Stadtrand weisen im Vergleich zu den oben genannten Bereichen einen diffuseren, nicht auf so engen Raum konzentrierten Temperaturübergang von der Innenstadt zum Freiland auf.[28]

b) Die Stadtteile Weingarten/Haslach, Betzenhausen/Baggersee und mit Einschränkungen auch Landwasser, Neuburg (nördlich der Innenstadt zwischen Friedrichring und Komturplatz) und Teile der Unterwiehre sind thermisch homogen, d. h. größere Areale weisen immer wieder wenig unterschiedliche Temperaturen mit immer wieder derselben Differenz zum Bezugspunkt auf.
c) Keineswegs alle Stadtteile mit homogener Bebauung sind auch thermisch homogen. Obwohl die Stadtteile Stühlinger, Bischofslinde oder Industriegebiet Süd in ihrer Baustruktur eine verhältnismäßig geringe Differenzierung aufweisen, wechseln die thermischen Bedingungen hier von Fall zu Fall stark. Überraschenderweise gilt dies auch für die Innenstadt.
d) Sekundäre Wärmeinseln bilden sich nicht nur in der Altstadt, sondern auch in den lokalen Zentren mehrerer Stadtteile aus.

Morgen, +3° . . . –4° (Karten 9 – 15)

Die gleichzeitige Betrachtung aller IA–Sammelkarten des Morgentermins zeigt dieselbe Grundstruktur wie beim eben besprochenen Abendtermin. Deshalb werden im folgenden nur noch die Unterschiede zu diesem aufgeführt.

Auffallendster Unterschied ist die Tatsache, daß zur Darstellung aller Fälle des Morgentermins eine geringere Anzahl von IA erforderlich ist. Morgens genügen acht 1–Grad–Stufen (IA –4° . . . +3°) gegenüber elf (IA –4° . . . +6°) beim Abendtermin. Hierin ist ein erster Hinweis auf die in der abendlichen Abkühlungsphase größere Wärmeinselintensität zu sehen. Einen Beweis kann allerdings nur die Analyse von Einzelfällen liefern, da die größere Temperaturamplitude der Gesamtmasse auch über die stärkere Streuung der Einzelfälle zustande kommen kann, ohne daß diese selbst eine vom Morgentermin unterschiedliche Amplitude haben müssen.
Weiterhin sind folgende Unterschiede festzustellen:
– Bei vergleichbarem, starkem horizontalen Temperaturgradienten östlich der Altstadt fehlt gegenüber dem Abendtermin die nördlich anschließende Gabelung der Linienschar in Herdern. Zu beobachten ist lediglich der Ast, der sich dem Hangverlauf anpaßt, nicht aber der, der den ganzen Stadtteil Herdern unabhängig von der Bebauung von S nach N quert. Dieser Sachverhalt wird bei der Diskussion der Hangzirkulation relevant.
– Sowohl die eigentliche Altstadt wie auch die weitere Innenstadt erscheinen als stärker von ihrer Umgebung abgehobene Inseln. Das eine wird deutlich durch die größere Anzahl kleinerer Ringstrukturen in der Altstadt, das andere vor allem durch eine ausgeprägte Linienschar, die von der Südspitze der Altstadt (zwischen Zentrum und Dreisam) ausgehend nach NW zieht und um eine Insel im Bereich Eschholzstr./Breisacher–Straße nach E umbiegt und dort an Deutlichkeit verliert.
– Die beim Abendtermin als homogen angesprochenen Bereiche sind weniger deutlich, insbesondere das Gebiet Betzenhausen/Baggersee.
– Die Anzahl sekundärer Wärmeinseln ist geringer.

– Die Linienschar, die der Grenze Freiland/Stadt folgt, ist nicht auf so engen Raum zusammengedrängt wie am Abend, d. h. das „Wärmeinselkliff" (vgl. Anm. 28) ist weniger steil. Deutlich ist dies im gesamten SW der Stadt (St.Georgen, Haid, Weingarten), in Lehen, zwischen Flugplatz und Industriegebiet, in Zähringen und weniger klar auch im Osten der Stadt.

Diese Unterschiede ergänzen sich zu einem einheitlichen Bild: Gegenüber dem Abendtermin ist morgens der äußere Rand der Wärmeinsel am Übergang Stadt – Freiland abgeschwächt, die Grenze zwischen Innenstadt i. w. S. und umliegenden Vororten dagegen verstärkt. Das „Wärmeinselkliff" ist an die Grenzen der Innenstadt zurückgewandert.

4.2.3. Einzelanalyse der Isanomalen–Sammelkarten

Detailliertere Aufschlüsse gibt die folgende Analyse einzelner IA–Sammelkarten, bei der die verschiedenen Temperaturstufen nacheinander behandelt werden.

Abend, –3°, –4° (Karte 2)

Die stärksten negativen Abweichungen von der Temperatur am Referenzpunkt, also auch die absolut tiefsten Werte innerhalb des erfaßten Geländeausschnitts, treten ganz eindeutig im NW im Mooswald unmittelbar östlich von Landwasser und im Bereich des Flugplatzes an dessen Grenze gegen Mooswald und Freiburg–West auf. Nur in zwei Fällen erscheinen entsprechende IA auch im E der Stadt. Festzuhalten bleibt, daß bei vergleichbarer Lage (Grenze Bebauung gegen Freiland, Westteil der Stadt) und genau gleicher Entfernung von der Innenstadt als vermutetem Zentrum der Wärmeinsel die Temperatur im Bereich Flugplatz/Mooswald häufig 3° – 4° unter der im Bereich Betzenhausen/Dreisam (Referenzpunkt Station Gaskugel) liegt.

Abend, –2° (Karte 3)

Auch diese Karte weist eine Linienkonzentration zwischen Südende des Flugplatzes und Nordende von Landwasser auf, während der gesamte übrige W und N der Stadt ohne Linien, also immer wärmer als –2° Abweichung von der Temperatur am Bezugspunkt E ist. Auch in Herdern treten die –2° – IA nur in höheren Lagen (> 300 m NN) im tobelartigen Taleinschnitt an der Wintererstraße auf.

Dagegen zeichnen sich jetzt auch die östlichen Stadtteile deutlich im IA–Bild ab. –2° Abweichung ist der Temperaturwert, der schon im erfaßten Gebiet erscheint, i. d. R. aber noch die gesamte Bebauung bis hinaus nach Littenweiler umfaßt und so die Grenze zwischen Oberwiehre /Waldsee/Littenweiler und dem südlich anschließenden steil ansteigenden bewaldeten Gelände bildet. Deutlich zeigt sich dabei, daß der ebenso steile, südexponierte Hang nördlich der genannten Stadtteile noch keine Linien aufweist, also normalerweise auch zum Termin der Abendmeßfahrten (nach Sonnenuntergang bis Mitternacht) noch wärmer ist als der nordexponierte Hang. Die Karte

Abend, –1° (Karte 4)

zeigt erneut dichte Linienscharung zwischen Flugplatz und Landwasser – die naturgemäß etwas weiter in Richtung Bebauung verschoben ist als die vorangegangene –, erstmals aber auch IA, die eine Begrenzung des Stadtgebiets nach W (westlich Lehen bis zur Höhe von Betzenhausen), nach N (Industriegebiet Nord, Zähringen) und nach NE (Herdern) erkennen lassen. Diese Linien verlaufen alle mehr oder weniger im Grenzbereich zwischen städtischer Siedlungsfläche und Freiland.

Umso auffallender ist die Scharung von IA, die südöstlich der Altstadt von der Spitze des Schloßberges aus in unterschiedlicher Lage den Stadtteil Wiehre quert. Dies ist innerhalb der bisherigen Betrachtung das erste Mal, daß ein großflächiges Areal mit städtischer Bau-

struktur vom Zentrum der Wärmeinsel aus gesehen außerhalb – also auf der 'kalten' Seite – einer IA–Schar bleibt. Die Stadtteile Oberwiehre/Waldsee/Littenweiler sind also häufig kälter als -1° Abweichung, d.h. viel kälter als das stadtnahe Freiland im W der Stadt. Gleichzeitig war aber oben festgestellt worden, daß die tiefsten Temperaturen (-3, -4°) praktisch nie im E, sondern in Landwasser/Freiburg West vorkommen. Wie der Vergleich mit der zuletzt behandelten Karte zeigt, liegt der Sprung zwischen Umfassung und Ausschluß der östlichen Stadtteile zwischen der -2° und der -1° – IA. Es ist also festzustellen, daß die östlichen Stadtteile zwar regelmäßig zu den kalten gehören, aber nie die kältesten sind.

Abend, -4° . . . -1° (Karten 2, 3, 4)

Die Überlagerung der bisher behandelten IA–Sammelkarten zeigt besonders deutlich den Gegensatz zwischen tiefen Temperaturen (starken negativen Abweichungen) gekoppelt mit auf engem Raum konzentriertem horizontalem Temperaturgradienten im NW östlich Landwasser bzw. an der Grenze zum Sternwald einerseits und völligem Fehlen von entsprechenden IA im ganzen W– und SW–Teil der Stadt andererseits. Da aber auch im SW der Übergang von der Bebauung zum Freiland innerhalb des erfaßten Bereichs liegt, kann das nur so gedeutet werden, daß der Stadtrandbereich im W und SW immer wärmer ist als der Stadtrand im NW, N, S oder gar im E, wo sogar ganze Stadtteile schon außerhalb der hier behandelten IA liegen.

Abend 0° (Karte 5)

Die Lücke im W und SW ist jetzt durch ein dichtes Linienbündel geschlossen, das ziemlich genau den Stadtrand nachzeichnet. Dasselbe gilt für den Bereich Schloßberghang nordöstlich der Altstadt. Im N (Industriegebiet, Zähringen, westliches Herdern) und südlich der Innenstadt liegen jetzt aber schon größere bebaute Areale außerhalb der IA, die hier erstmals als geschlossene Ringe den zentralen Teil der Stadt umfassen. In den östlichen Stadtteilen kommen Temperaturen 0° Abweichung nur noch in Einzelfällen vor. Die 0°–Linie, die im W den Stadtrand markiert, verläuft im E weit innerhalb der Bebauung, zeigt also eine in Bezug auf die Baustruktur der Stadt nach W verschobene Lage der Wärmeinsel an. Mehrere 0°–IA schließen die Stadtteile Mittel– und Unterwiehre nicht ein, sondern springen unmittelbar südlich der Altstadt weit nach W zurück, in einigen Fällen bilden sie eine mehr oder weniger weit nach W in eine Umgebung von $> 0^{o}$ Abweichung vordringende Zunge kälterer Luft. Insgesamt herrschen westlich und südwestlich der Altstadt W–E gerichtete Linienzüge vor, d. h. es tritt ein N–S gerichteter horizontaler Temperaturgradient zwischen $>0^{o}$ Abweichung in der nördlichen und $<0^{o}$ Abweichung in der südlichen Innenstadt auf. Bemerkenswerterweise gibt es keine entsprechende N–S Differenzierung in der Baustruktur der Stadt, die als Erklärung herangezogen werden könnte, vielmehr queren die IA gerade im Stadtteil Wiehre einen besonders homogenen Baubestand.

Neben der thermischen Verschiedenheit von westlichem und östlichem Stadtrand tritt also noch eine ebenfalls baustrukturunabhängige Differenzierung in wärmeren Nord– und kälteren Südteil der weiteren Innenstadt. Zum folgenden Text vgl. Karte 16. Während im Nordteil beinahe vom Schloßberghang bis weit nach W (Betzenhausen, Freiburg–West) ein ca. 5 x 1.5 km^2 großes Gebiet bei allen Meßfahrten mehr als 0° Abweichung aufwies, ist dies im Südteil nirgends der Fall. Bis unmittelbar an den Südrand der Altstadt (Martinstor, Werthmannplatz) wurden in Einzelfällen Temperaturen gemessen, die unter denen des Referenzpunktes liegen.

Abend, $+1^{o}$ (Karte 6)

Diese Karte bestätigt die eben festgestellte thermische Trennung zwischen N– und S–Teil der Stadt. Im N ist die Liniendichte insgesamt größer, d. h. Abweichungen von der Tempera-

tur des Referenzpunktes von $+1^{o}$ und mehr treten hier häufiger auf als im S. Mehrere etwa gleich verlaufende IA markieren ein Kerngebiet, das die Altstadt und von dort ausgehend zwei große nach NW und N gerichtete Loben umfaßt (westlich und östlich des Flugplatzes). Die in etwa 500 – 800 m Abstand parallel zur Dreisam verlaufende Südbegrenzung des ersten Lobus zeigt wieder die Bevorzugung der (N)W – (S)E – Richtung der IA im Bereich westlich der Altstadt. Im NW und N liegt die größte Scharung von Linien jetzt freilich mitten in der bebauten Zone! Landwasser und das Industriegebiet Nord werden nur noch von zwei bzw. einer Linie eingeschlossen.

Der Linienverlauf im E scheint zunächst den früheren Beobachtungen zu widersprechen, als festgestellt wurde, daß die -1° bzw. 0° IA den Stadtteil Wiehre häufig von N nach S queren und so die kälteren östlichen Stadtteile Oberwiehre, Waldsee und Littenweiler vom Stadtinneren trennen. Hier dagegen zeigen mehrere $+1^{o}$ –IA eine deutliche Ausbuchtung nach E, d. h. die genannten Stadtteile sind thermisch unmittelbar an die Innenstadt angeschlossen. Wie im N und NW greift hier vom Zentrum der Wärmeinsel aus ein Lobus auch in das Dreisamtal ein; er dringt jeweils in der Talmitte, wo auch die Bebauungsdichte am größten ist, am weitesten nach E vor. Dieses Isolinienbild ist der Baustruktur gut angepaßt.

Dieser Befund gibt den Stadtteilen im Dreisamtal (südliche Innenstadt, Unterwiehre bis Littenweiler) eine Sonderstellung. In den übirgen in das Freiland ausgreifenden Stadtteilen, z. B. im NW oder N, ist beim Übergang von den negativen zu positiven Werten der Temperaturabweichung lediglich ein allmähliches Zurückweichen der IA in Richtung auf das Zentrum der Wärmeinsel zu beobachten. Hier dagegen liegen zwei völlig verschiedene Typen vor:
Während die $+1^{o}$ – IA ins Dreisamtal eingreifen und Teile der östlichen Viertel mitumfassen, verlaufen die 0° – oder -1° – IA nicht wie zu erwarten weiter in Rchtung Stadtrand, hier also E, sondern vielmehr kernnäher quer durch die Unterwiehre oder sogar noch weiter im W. Die zu diesem letzten Fall zugehörigen $+1^{o}$ – IA finden sich dann nur nördlich der genannten N–S– Trennungslinie parallel zur Dreisam. Ein Typ zeigt also eine etwa der Baustruktur entsprechende Anordnung, die als etwa konzentrisch um die Altstadt verlaufende Ringe auch nach S und SE ins Dreisamtal ausbuchten. Der andere weist die im Dreisamtal gelegenen Stadtteile bis weit nach W gegenüber dem nördlich und nordwestlich der Altstadt gelegenen Bereich als kälter aus, steht also innerhalb der weiteren Innenstadt in klarem Widerspruch zur Baustruktur. Beide Typen sind durch jeweils mehrere Fälle belegt.

Abend, $+2^{o}$ (Karte 7)

Die insgesamt geringe Liniendichte zeigt, daß bei weitem nicht in allen untersuchten Fällen Abweichungen von $+2^{o}$ auftreten.

Die oben abgeleitete thermische Bevorzugung der nördlich der Dreisam gelegenen Stadtteile kommt erneut zum Ausdruck: Nur in zwei Fällen liegt das Temperaturniveau so hoch, daß die $+2^{o}$ – IA auch die südliche Innenstadt mit umfaßt. Bezeichnenderweise umschließen diese beiden Linien auch den gesamten W und SW, nicht aber die östlichen Stadtteile, demonstrieren also erneut die W–Verlagerung der Wärmeinsel. Auch die übrigen Isolinien in der Innenstadt zeigen deutlich, daß die Altstadt, also der Bereich größter Bebauungsdichte nicht zentral, sondern peripher in einer größeren nach NW und N ausgedehnten Wärmeinsel liegt.

Entsprechend dem hier repräsentierten, gegenüber den bisherigen Karten höheren Temperaturniveau treten jetzt vermehrt ringförmige IA geringen Flächeninhalts auf, die sekundäre Wärmeinseln anzeigen.

Abend, $+3^{o}$ . . . $+6^{o}$ (Karte 8)

Die stärksten positiven Temperaturabweichungen konzentrieren sich eindeutig auf die nördliche Innenstadt, hier liegt das Zentrum mehrerer ringförmiger IA. Die Altstadt liegt peripher

zu diesem Zentrum. Sie wird von den genannten IA in W—E—Richtung gequert. Nur zwei IA umschließen die Altstadt nahezu konzentrisch. Kleine ringförmige IA, also lokale „Gipfel" der Wärmeinsel, liegen außer im nördlichen Teil der Altstadt auch im Bereich Hauptbahnhof/Stühlinger, am Süd— und Nordende des Güterbahnhofs, aber auch in Haslach (Eschholz—/ Haslacherstraße und Baslerstraße).

Auch die oben beschriebenen W—E und N—S—Differenzierungen sind erneut zu erkennen.

Die Ergebnisse der deskriptiven Analyse der einzelnen IA—Sammelkarten des Abendtermins läßt sich in folgenden Punkten zusammenfassen:

- Die tiefsten Temperaturen (-4° und -3° geringer als am Referenzpunkt) treten regelmäßig im äußersten NW der Stadt beim Übergang vom Stadtteil Landwasser zum Mosswald auf.
- In einigen Stadtteilen wird die Bebauungsgrenze immer wieder durch dieselben eng gescharterten IA markiert:
  - -3° Landwasser (Ostseite)
  - -2° Oberwiehre/Waldsee/Littenweiler (Südseite)
  - 0° Weingarten/Haslach/St.Georgen und Ostseite der Altstadt/Herdern.
- Im NW (Bischofslinde/Lehen) und N (Industriegebiet Nord/Zähringen) ist die Grenze zwischen Stadt und Freiland thermisch weniger deutlich, gleiche IA sind räumlich nicht fixiert und schwanken von Fall zu Fall über größere Horizontaldistanzen.
- Die Stadtteile im Dreisamtal (Wiehre/Waldsee/Littenweiler) sind kälter als die im W der Stadt. In der Mehrzahl der Fälle liegt bereits die Mittelwiehre ausserhalb der 0°—IA, die im W den Stadtrand bezeichnet.
- Die Stadtteile südlich der Dreisam — also einschließlich der westlichen — sind kälter als die nördlich davon. Dies geht daraus hervor, daß
  - zahlreiche IA (0°, $+1^{o}$) unmittelbar südlich der Altstadt nach W/NW umbiegen (N—S—Gradient)
  - das geschlossene Gebiet, in dem die Temperaturen nie tiefer als am Referenzpunkt liegen, nicht über die Dreisam nach S ausgreift (Karte 16)
  - die absolut höchsten positiven Abweichungen nur im Nordteil der Stadt vorkommen.
- Der Bereich südlich der Altstadt (Mittelwiehre) ist in Bezug auf die angrenzenden Stadtteile thermisch uneinheitlich. In einigen Fällen ist er in die die Altstadt umgebenden IA mit einbezogen ($+1^{o}$), in anderen durch eine markante IA—Bündelung davon getrennt (0°, $+1^{o}$).
- Die höchsten Temperaturen treten weniger in der Altstadt als nördlich davon auf.
- Geht man davon aus, daß die Innenstadt mit der größten Bebauungsdichte das potentielle Wärmeinselzentrum darstellt, so ergänzen sich die vier zuletzt genannten Punkte zu folgender Aussage: Die Wärmeinsel ist geprägt von einem Gegensatz zwischen kühleren Süd— und wärmeren Nordteil. Die Grenze zwischen beiden hat keine Entsprechung in der Baustruktur, sie liegt unmittelbar südlich der Altstadt. Das Zentrum der Bebauung und das der Wärmeinsel fallen nicht zusammen, letzteres liegt vielmehr nördlich der Altstadt. Im kühleren Südteil ist die Wärmeinsel gegenüber der zu erwartenden Lage außerdem nach Westen verschoben.

Inwieweit gilt dieses Bild auch für *Morgentermin?* Wie im Abschnitt 4.2.2. werden auch hier die einzelnen IA—Sammelkarten nur auf Unterschiede gegenüber dem Abendtermin untersucht, da die Grundstruktur in beiden Fällen gleich ist.

Morgen, -3°, -4° (Karte 9)

Wie abends treten die tiefsten Temperaturen im NW an der Grenze der Bebauung gegen den Mooswald auf. Die IA—Scharung ist jedoch morgens noch dichter und deutlicher auf die Linie Ostrand Landwasser — NW—Ecke des Flugplatzes konzentriert. Abweichungen von -4°

bzw. – 3° treten morgens also mit noch größerer Häufigkeit und Beständigkeit auf. Bemerkenswert ist eine IA (–3°), die von Herdern kommend östlich der Altstadt vorbeiführt und dann nach SW ausbiegt. Dies bedeutet, daß der ganze altstadtnahe und z. T. dicht verbaute Bereich östlich der Hauptbahn und südlich der Dreisam mehr als 3° kälter ist als die am westlichen Stadtrand im Freiland gelegene Station E (Betzenhausen).[29] Die oben beschriebene W – E – und S – N–Asymmetrie der Wärmeinsel ist morgens also – wenn auch zunächst nur für einen Fall – bereits bei den tiefsten überhaupt vorkommenden Temperaturen belegt. Abends war dies erst bei der 0°–IA zu erkennen.

Morgen, –2° (Karte 10)

Gegenüber der entsprechenden Karte des Abendtermins fällt vor allem das Fehlen der ausgeprägten IA–Scharung am Südrand der östlichen Stadtteile (Grenze Wiehre/Sternwald) auf. Da auch auf der folgenden Karte der –1° –IA die Linienscharung an dieser Stelle nicht der des Abends entspricht, heißt dies, daß der abends scharfe thermische Gegensatz zwischen Bebauung und nord–exponiertem Schattenhang am Morgen abgemildert bzw. ganz beseitigt ist.

Morgen, –1° (Karte 11)

Diese Karte gleicht im wesentlichen der entsprechenden des Abendtermins. Eine Besonderheit bildet lediglich die IA, die parallel zur Dreisam auf das Zentrum der Altstadt zuläuft und von dort nach W (Herdern) abbiegt. Dies ist ein weiterer Beleg für den N – S–Gradienten der Temperatur in der weiteren Innenstadt, der keine Entsprechung in der Baustruktur aufweist.

Morgen, –4° . . . –1° (Karten 9, 10, 11)

Die Kombination der bishrigen Karten verdeutlicht diesen Gradienten nochmals durch das Vorherrschen W–E gerichteter IA innerhalb des Stadtgebiets wesetlich der Altstadt. Auffällig wiederum, da- der gesamte W/SW der Stadt keine IA aufweist (– die Fortsetzungen müssen im Freiland gedacht werden –), der Stadtrand dort also im Vergleich zu anderen Stadtteilen warm ist.

Morgen, 0° (Karte 12)

Das IA–Bild unterscheidet sich von der entsprechenden Abend–Karte v. a. durch das Fehlen der engen Scharung zahlreicher IA am Stadtrand im SW, am Flugplatz und östlich der Altstadt. Es verlaufen an diesen Stellen weniger IA, die zudem räumlich weniger klar fixiert sind; sie liegen innerhalb eines breiten Übergangsbereichs von Fall zu Fall ganz verschieden, einmal im Freiland, dann wieder weit innerhalb der Bebauung. Der Rand der städtischen Wärmeinsel, der abends für fast alle Meßfahrten durch die Gesamtheit der Morgenaufnahmen nicht so eindeutig bestimmt.

Im NW (Bischofslinde), SW (Weingarten) und auch von S her (Unterwiehre, Stühlinger/Dreisam) sind die 0° – IA weiter gegen das Stadtzentrum vorgerückt als abends. In vergleichbarem Temperaturniveau ist also morgens der Durchmesser der Wärmeinsel geringer. Dies geht auch aus Karte 16 hervor, die den im Vergleich zum Abendtermin wesentlich reduzierten Bereich zeigt, der bei allen Morgenmeßfahrten höhere als die am Referenzpunkt gemessene Temperatur aufweist. Das Zentrum der so definierten Fläche liegt nordwestlich der Altstadt; die gegenüber dem Bebauungsschwerpunkt verschobene Lage des Zentrums der Wärmeinsel gilt also auch für dem Morgentermin.

In der überwiegenden Zahl der Fälle ist freilich die Altstadt noch von der 0° – IA eingeschlossen. Dies gilt nicht mehr für die südlich angrezenden Stadtteile. Vielmehr ist hier das Ausbuchten der IA vom südlichen Altstadtrand nach NW noch häufiger und ausgeprägter.

In drei Fällen ist eine markante Zunge kühlerer Luft von E an der Innenstadt vorbei bis über die Hauptbahnlinie hinaus nach W zu verfolgen.

Andererseits biegen mehrere 0° – IA auch sehr deutlich nach E in das Dreisamtal ein. Der oben im Absatz Abend, $+1^{o}$ erläuterte Befund eines thermisch uneinheitlichen Verhaltens der Stadtteile im Dreisamtal (zwei Typen) tritt morgens auf einem tieferen thermischen Niveau – 0° statt $+1^{o}$ – sogar noch ausgeprägter in Erscheinung. Beide Typen, die nach W vordringende Zunge kühlerer Luft und das in ungefährer Anpassung an die Baustruktur erfolgende Ausgreifen der IA vom Stadtzentrum ins Dreisamtal hinein, sind morgens deutlicher entwickelt.

Morgen $+1^{o}$ (Karte 13)

Diese Karte weist gegenüber der entsprechenden des Abendtermins keine gravierenden Unterschiede auf. Augenfälligstes Merkmal ist wie bei jener die größere Liniendichte in den nördlichen Stadtteilen und die N und S trennende Linienscharung parallel zur Dreisam zwischen Südende der Altstadt und Bischofslinde. Allenfalls erscheinen sekundäre Wärmeinseln wie Weingarten/Haslach, Bischofslinde, Klinikum/Berliner Allee und Güterbahnhof/Industriegebiet Nord noch deutlicher. Dies fügt sich gut in einen Zusammenhang mit der Beobachtung, wonach die äußere Grenze (0°) der Wärmeinsel morgens weniger ausgeprägt ist: Der stabile Rand der Wärmeinsel hat sich morgens von den Stadträndern auf die Zentren der Bebauung zurückverlagert.

Morgen, $+2^{o}$ (Karte 14)

Auch hier ergeben sich keine signifikanten Unterschiede. Die Konzentration der IA auf die Stadtteile nördlich der Dreisam ist offensichtlich, es treten aber wie abends einige Fälle auf, bei denen die $+2^{o}$ – IA weite Teile des SW, W und N mitumfaßt. Landwasser, Betzenhausen/Freiburg–West, der N des Industriegebiets und der ganze E im Dreisamtal (mit einer Ausnahme) bleiben unter $+2^{o}$ Abweichung von der Temperatur am Referenzpunkt. Klarer als abends tritt schon hier, noch unterhalb der Maximalwerte, der Nordteil der Altstadt und die nördliche anschließende Umgebung als wärmster Teil der Stadt hervor.

Morgen, $+3^{o}$ . . . 5° (Karte 15)

Bei den IA mit der größten positiven Abweichung gegenüber dem Referenzpunkt, d. h. bei den höchsten Temperaturen, unterscheiden sich die beiden Termine stark. Wesentlich eindeutiger als am Abend liegt das eigentliche Zentrum der Wärmeinsel morgens in der Innenstadt. Die IA sind klar auf die Altstadt und in einigen Fällen die weitere Innenstadt einschließlich des Stadtteils Stühlinger konzentriert. Isoliert außerhalb liegende IA treten nur zweimal, im Zentrum von Haslach und – überraschenderweise – in Littenweiler, auf. Im Gegensatz zum Abend kommen im ganzen W und im N keine Maximalwerte vor. Obgleich auch morgens innerhalb der Innenstadt eine deutliche N – S – Asymmetrie der IA – Verteilung mit ortsfester Konzentration am Südrand der Altstadt und mehr oder minder weitem Ausbiegen nach N und W ein im Mittel mehr am Nordrand der Altstadt liegendes Wärmeinsel–Zentrum anzeigt, fehlt doch die extreme Nordverlagerung der Maximalwerte bis in das Industriegebiet. Freilich sind auch hier die Stadtteile nördlich der Dreisam thermisch bevorzugt. Im S treten die Maximalwerte nur in Ausnahmefällen auf.
Weiterhin fällt auf, daß trotz vergleichbarer Anzahl von Fällen die absolute Häufigkeit in IA im Innenstadtbereich morgens größer ist. Dies muß, nach dem was über den stadteinwärts verschobenen Rand der Wärmeinsel gesagt wurde, nicht heißen, daß morgens häufiger als abends hohe positive Abweichungen gegenüber dem Freiland existieren. Vielmehr kann dies darauf zurückgeführt werden, daß die Temperatur am Referenzpunkt morgens häufiger der Temperatur des Freilandes entspricht, mithin große Differenzen zum Stadtzentrum ausgewiesen werden, während sie abends bei westlich verlagertem Wärmeinsel–

Rand noch von der Wärmeinsel geprägt ist, die thermischen Differenzen zum Zentrum also geringer sind. Die große Häufigkeit hoher positiver IA in der Innenstadt kann somit als weiterer, indirekter Beleg für den morgens stadtwärts gerückten Wärmeinsel—Rand angesehen werden.

Die Besprechung der IA – Sammelkarten des Morgentermins läßt sich in folgenden Punkten zusammenfassen:

- Die Lage der Bereiche tiefster (–4°) und höchster (+5°) Temperaturabweichung gegenüber dem Referenzpunkt entspricht dem Abendtermin.
- Wie abends weisen die Stadtteile nördlich der Dreisam häufigere und höhere positive Temperaturabweichungen auf. Die Nordverlagerung des Wärmeinsel—Zentrums in Bezug auf die Altstadt ist ebenfalls vorhanden, aber nicht so stark ausgeprägt wie abends.
- Die Westverschiebung der Wärmeinsel innerhalb der südlichen Stadtteile (Dreisamtal, Haslach, Weingarten) zeichnet sich bereits in der –3° – IA ab (im Gegensatz dazu Abend: 0°).
- Die aus dem Dreisamtal an der Altstadt vorbei führende Zunge kälterer Luft reicht weiter nach W als abends. Aber auch die vom Stadtzentrum nach E ins Dreisamtal ausbiegenden IA sind weitreichender und häufiger. Die beiden sich ausschließenden Typen des thermischen Zustands im Stadtteil Wiehre sind demnach ausgeprägter als abends.
- Über weite Strecken des Stadtumfangs fällt abends die Grenzlinie zwischen Bebauung und Freiland zusammen mit einer Zone großer IA—Häufigkeit (meist 0°). Morgens ist das nicht der Fall. Der Bebauungsrand bildet keine stabile, d.h. häufig in derselben Lage anzutreffende, thermische Grenze. Dagegen zeichnen sich die Zentren sekundärer Wärmeinsel morgens im IA—Bild deutlicher ab.

4.2.4. Unterschiedliche Wärmeinseltypen

Die bisherige Analyse bezieht sich auf die Gesamtheit der herangezogenen Meßfahrten. Dabei ergaben sich besonders für die Stadtteile im Dreisamtal Hinweise, daß prinzipiell verschieden strukturierte Wärmeinseltypen existieren. Um zu dieser Frage genauer Stellung nehmen zu können, werden im folgenden die IA – Karten einzelner Meßfahrten (also nicht die Sammelkarten) zu Typen geordnet. Aus den im Abschn. 4.2.1. erläuterten Gründen wird dabei zunächst von der formalen Struktur der IA ausgegangen und dann die Verknüpfung mit anderen Parametern versucht. Bei der Benennung unterschiedlicher Lagen der Wärmeinsel wird dabei auf eine fiktive „Normal"—Wärmeinsel Bezug genommen, deren IA als kongruent mit den die Altstadt umschließenden Linien etwa gleicher Bebauungsdichte gedacht werden. Dies dient nur der schnelleren Verständigung, die Realität verschiedener Wärmeinsellagen hängt nicht von der tatsächlichen Existenz eines Baumassen—Schwerpunktes Altstadt ab. Bei anderen Typen wird die Abweichung von dieser angenommenen Normallage beschrieben.

Typ 1: Normallage der Wärmeinsel*

Nach der oben gegebenen Erläuterung ist darunter folgende IA – Anordnung zu verstehen: Die Altstadt bildet das Zentrum einer Schar von IA, die zum Stadtrand hin abnehmende Temperatur anzeigen und die etwa den aus der topographischen Karte ersichtlichen Unterschieden in der Bebauungsdichte folgen. Da die Altstadt unmittelbar am Schloßberghang liegt und die bauliche Ausdehnung v. a. nach N, W, SW erfolgte, sind nicht konzentrische, sondern östlich der Altstadt enggescharte, in den genannten Ausbaurichtungen dagegen weitabständige IA zu erwarten. Wichtig im Hinblick auf die Abgrenzung von anderen Typen ist, daß IA, die z. B. den Stadtteil Stühlinger einschließen auch den ähnlich strukturierten und gleich weit vom Stadtzentrum entfernten Stadtteil (Mittel—) Wiehre im S der Altstadt

* Außer in den Überschriften wird im folgenden Wärmeinsel mit WI abgekürzt.

mit umfassen. In den dichten Neubaugebieten nahe dem Stadtrand (Industriegebiet Nord, Landwasser, Weingarten) sind sekundäre WI möglich.

Zu diesem Typ gehören lediglich die drei in Tab. 14 aufgeführten Fälle, der theoretisch zu erwartende Normalfall ist also ausgesprochen selten. Die Tabelle gibt außerdem die wichtigsten Kenngrößen für die Wetterverhältnisse während der Meßfahrt wieder (vgl. auch Tab. 13).

Außer in der formalen Struktur des IA – Bildes stimmen die hier herangezogenen Fälle auch in hohem Maß in den jeweils herrschenden Wetterbedingungen überein: Es herrschte jeweils ein stabiles Hoch über Mitteleuropa, das bei sehr geringer oder ganz fehlender Bewölkung an der Referenzstation Temperaturen in Gefrierpunktnähe brachte. Der Wind war durchweg schwach.

Tabelle 14: Wärmeinseltyp 1, Daten und wichtigste meteorologische Parameter

Nr. d. Meßfahrt laut Tabelle 13	Meßfahrt	Uhrzeit[1]	Temperatur[1] [°C]	Windrichtung[2]	Windgeschwindigk.[2] [m/sec]	Gesamtbewölkung[2] [in Achtel]	Wetterlage	WI-Intensität [°C]
50	5.2.73	20.11	–1.1	SE/SSW	0.9/1.2	– –	HM	6.8
60	21.3.73	5.05	–0.6	NE/SSE	0.8/2.5	– –	HM	6.2
61	22.3.73	4.56	0.2	ESE/SE	0.7/0.1	1	HM	7.5

1 Für die Korrektur maßgebende Uhrzeit bzw. dabei gemessene Temperatur (Nullwert) am Bezugspunkt.
2 Gültig für Wetteramt Freiburg, Stefan-Meier-Straße.
Mehrere Beobachtungen während der Dauer einer Meßfahrt durch / getrennt.

Typ 2: Normallage des Wärmeinselzentrums, mit W – E Temperaturgradient im Bereich Wiehre

Wie bei Typ 1 ist hier die Altstadt Zentrum der WI, die weitere Innenstadt und der Übergangsbereich zu den Vororten im N, W und SW ist weitgehend homogen temperiert. Sekundäre WI kommen vor. Lediglich nach E erfolgt innerhalb der Bebauung ein deutlicher Temperaturrückgang. Dies ist an den von N nach S gerichteten IA im Stadtteil Wiehre zwischen Altstadt/ Schloßbergsüdhang und Sternwald zu erkennen. Zu dieser Gruppe gehören:

Tabelle 15: Wärmeinsel 2 (Legende vgl. Tabelle 14)

17	9.3.72	6.58	0.0	ESE/ESE	4.5/1.0	3	TrW	8.0
21	23.3.72	20.15	11.7	SE/SE	1.2/2.1	– –	HB	8.2
57	20.3.73	6.05	–2.4	ESE	3.3	1	NWa	6.3
62	26.3.73	20.45	9.6	NE/N	1.8/0.7	7	TrW	4.9

Einzige Gemeinsamkeit dieser Fälle ist die, daß alle aus dem Monat März stammen. Ansonsten fallen nur krasse Unterschiede in den Randbedingungen auf: Zweimal ist der Morgentermin, zweimal der Abendtermin vertreten, die Temperaturen am Bezugspunkt umfassen eine Spanne von 14.1° C, neben wolkenlosem kommt fast völlig bedeckter Himmel vor und auch die Winddaten sind uneinheitlich. Die folgenden drei Typen sind verwand. Ihr gemeinsames Merkmal ist eine mehr oder weniger starke NW und N – Verlagerung des Zentrums der WI gegenüber der theoretisch zu erwartenden Lage in der Altstadt. 'Gipfel' der WI und Zentrum der Bebauung fallen nicht zusammen. Nach NW und N ist bis in die Vororte der

Temperaturabfall von der Stadtmitte aus nur gering, innerhalb der homogen bebauten Innenstadt existiert dagegen ein Temperaturgefälle von N nach S. Die Unterschiede zwischen den Typen 3, 4 und 5 liegen im IA – Verlauf im Bereich südlich der Altstadt. Erneut zeigt sich die Sonderrolle der Stadtteile im Dreisamtal, deren thermisches Milieu einmal den angrenzenden Stadtteilen gleicht, dann wieder völlig davon abweicht.

Typ 3: NW / N – Verlagerung des Wärmeinselzentrums, aber Normallage der IA im Bereich Wiehre.

Wie bei Typ 1 greifen die IA im Dreisamtal entsprechend der Bebauung von der Schloßbergspitze aus nach E, umfassen die Mittelwiehre und biegen an deren Südrand nach W um. Wie für die Normallage zu erwarten, erfolgt also von der Altstadt aus ein allmählicher thermischer Übergang auch nach S und SE. Das eigentliche Zentrum der WI jedoch liegt nicht mehr in der Altstadt, sondern an deren nördlichem Rand (Siegesdenkmal / Stadtgarten) oder noch weiter im NW (Breisacherstraße zwischen Eschholzstraße und Bahn) oder N (Südspitze des Güterbahnhofs). Die tieferen IA buchten in diese Richtungen entsprechend stark aus.

Tabelle 16: Wärmeinsel 3 (Legende vgl. Tabelle 14)

59	20.3.73	20.27	3.4	N/E	1.5/1.6	– –	NWA	6.0
63	27.3.73	4.50	6.2	WNW/S	0.2/1.4	7	TrW	5.7
86	14.8.73	4.23	14.4	NNE/NNE	1.0/1.6	– –	TB	7.3
90	4.9.73	4.40	15.4	ENE/–/SSW	1.1/–/1.0	– –	Wa	7.1
96	25.9.73	12.30	15.1	WNW/N/N	2.2/2.5/2.4	3	TrM	3.3
97	25.9.73	18.08	13.8	N/N	4.1/3.4	4	TrM	3.6

Auch in dieser Gruppe stehen wieder Fälle mit sehr unterschiedlichen Randbedingungen nebeneinander. Lediglich das Überwiegen von im Vergleich zu den Typen 1 und 2 hohen Temperaturen am Bezugspunkt sowie das der Nordkomponente der Windrichtung lassen sich als Gemeinsamkeiten feststellen.

Typ 4: NW – Verlagerung der Innenstadt – Wärmeinsel, N – S – Gradient südlich der Altstadt.

Die NW und N– Verlagerung ist gegenüber Typ 3 noch ausgeprägter, erkennbar daran, daß – bis auf zwei Ausnahmen – überhaupt kein kleinräumiger 'Gipfel' der WI in Altstadtnähe mehr vorhanden ist. Vielmehr greifen selbst die hochrangigen IA weit nach NW und N (bis Bischofslinde, Freiburg–West, Industriegebiet Nord) aus, es existiert also eine großflächige aber homogene WI, die insgesamt verschoben ist. Im gesamten Bereich südlich der Dreisam dagegen herrscht ein von N nach S gerichtetes Temperaturgefälle. Die mehr oder weniger von W nach E verlaufenden EI behalten diese Richtung auch südlich der Altstadt bei.

Bei den beiden aufgeführten Morgenmeßfahrten handelt es sich um die oben genannten Fälle, die zwar W – E gerichtete IA im Südteil der Stadt aufweisen und deshalb hier eingeordnet wurden, die aber im Gegensatz zu den übrigen einen WI – 'Gipfel' von geringem Durchmesser (< 0.5 km) in Altstadtnähe haben. Alle aufgeführten Abendmeßfahrten weisen ein großes (> 2 km) WI – 'plateau' auf. Weitere Gemeinsamkeiten sind bei der Windrichtung zu erkennen, wo die SE–Komponente eindeutig überwiegt. Bemerkenswert ist auch die trotz unterschiedlicher Bewölkungsverhältnisse ähnliche WI – Intensität.

Tabelle 17: Wärmeinseltyp (Legende vgl. Tab. 14)

34	7.10.72	6.11	2.1	SE/C	0.8	1	HM	4.9
47	23. 1.73	6.28	–2.1	ESE/E	1.5/1.4	6	BM	4.4
56	19. 3.73	21.10	2.2	SE/SE/ESE	2.1/3.9/2.8	4	NWa	4.9
68	16. 4.73	20.55	7.2	SE/SE	3.9/5.6	3	BM	4.9
81	30. 7.73	23.03	18.7	ESE/ESE	6.9/6.1	1	Nz	4.4
83	6. 8.73	22.52	22.3	ESE/ESE	6.9/6.1	1	Ww	6.1
94	24. 9.73	22.57	9.8	SE/SE/SE	1.5/2.9/1.7	– –	TrW	5.0

Typ 5: NW – Verlagerung des Wärmeinselzentrums, ausgeprägte Kaltluftzunge im Dreisamtal

Dieser Typ ist gekennzeichnet durch eine zungenförmige Einbuchtung der IA im Bereich südlich der Altstadt. Im Stadtteil Wiehre liegt eine von E südlich der Altstadt nach W vordringende Zone kälterer Luft, die diesen Bereich thermisch stark von anderen ähnlich strukturierten Stadtteilen abhebt. Das unterschiedlich weite Vordringen nach W und der Gegensatz zum Typ 3 zeigen, daß dieser IA–Verlauf von der Bebauungsstruktur unabhängig ist. Die übrigen Merkmale, insbesondere die NW und N – Verlagerung des WI–Zentrums entsprechen Typ 4.
Zu Typ 5 gehören:

Tabelle 18: Wärmeinseltyp 5 (Legende vgl. Tabelle 14)

32	5.10.72	19.00	15.4*	E	4.3	2	HM	8.8
52	1. 3.73	20.47	2.0	E/SE	2.1/3.4	– –	Wa	6.4
69	17. 4.73	4.27	2.5	SE/SE	3.3/3.5	3	Nz	6.9
77	3. 7.73	1.37	20.0	SE/SE	3.0/1.5	– –	HFa	6.8
79	10. 7.73	3.15	13.4*	ESE	2.5	– –	Ww	4.4
85	13. 8.73	22.38	19.2	E/E	6.8/6.9	– –	HB	6.8
89	3. 9.73	22.34	19.0	SE/SE	4.9/5.1	– –	Wa	8.8
95	25. 9.73	5.44	7.0	SE/SE	3.2/2.9	– –	TrM	7.0

* Bezugspunkt nicht Station Betzenhausen, sondern Flugplatz.

Bei den Meßfahrten, deren IA – Verlauf eine Kaltluftzunge im Bereich der Wiehre anzeigt, ist die Windrichtung am Wetteramt in allen Fällen fast identisch. Sie schwankt nur zwischen E und SE, wobei SE überwiegt. Die Windgeschwindigkeiten sind, verglichen z.B. mit Typ 1 und 3, hoch; die Bewölkung ist durchweg gering und die WI–Intensität groß. Auffällig ist, daß von den 8 Fällen keiner aus den Wintermonaten stammt. Auch aus den übrigen Jahreszeiten sind – bis auf zwei Ausnahmen – nur Situationen mit hohem Temperaturniveau vertreten. Diese Punkte zeigen die Verwandtschaft der Typen 4 und 5, die ja auch in der formalen Struktur der IA zum Ausdruck kommt.

Außer diesen jeweils durch mehrere Beispiele belegten Typen, die auch im nicht zu Karten verarbeiteten Material immer wieder in ähnlicher Form auftreten, gibt es einige IA–Konfigurationen, die sich deutlich von den bisher genannten Typen unterscheiden, im hier behandelten Material aber Ausnahmen darstellen.

Sonderfall 1: Südverlagerung des Wärmeinselzentrums

Bestimmendes Merkmal der Typen 4 und 5 ist der krasse N–S–Temperaturgradient im homogen bebauten Gebiet unmittelbar südlich des Kerns der Altstadt (Martinstor) einerseits und die nur allmähliche Temperaturabnahme nach NW/N andererseits. Auch bei den übrigen Typen, die nach anderen bestimmenden Merkmalen benannt wurden, liegt das Zentrum der WI eher nördlich des Stadtzentrums.

Die Situation, die sich vom 29.10. zum 30.10.73 entwickelte, bildet demgegenüber eine seltene Ausnahme mit grundsätzlich anderer IA–Anordnung.

Tabelle 19: Sonderfall 1

101	29.10.73	20.32	5.2	NNE/WNW	0.2/1.0	8	HB	3.4
102	30.10.73	6.06	3.9	NNE/ESE	1.5/1.8	8	HB	1.7

Bei vollständiger und tiefliegender Stratusbewölkung war die WI–Intensität nur schwach.[30]

Nur die +1° – IA hebt die weitere Innenstadt von den Vororten ab. Ihr Verlauf am Abend des 29.10. mit der Ausbuchtung ins Dreisamtal und der sekundären WI nordwestlich der Innenstadt entspricht annähernd Typ 3. Bemerkenswert ist aber, daß diese IA im Norden der Stadt ungewöhnlich zentrumsnah verläuft, dafür aber ungewöhnlich weit nach S ausbiegt. – Während der Nachtstunden bis zum Morgentermin des 30.10. hat sich dann ein eindeutig nach S verschobenes WI–Zentrum entwickelt. Der höchste Temperaturwert tritt südöstlich des Schwabentors auf, der ganze S und E (Unterwiehre–Waldsee) weist höhere Temperaturen auf als der N und NW, und die Altstadt wird von einer IA gequert, die ein S–N–Temperaturgefälle anzeigt.

Die absoluten Temperaturunterschiede sind im vorliegenden Fall zwar gering, die Einzelwerte sind aber so eindeutig verteilt, daß aufgrund der genannten Charakteristika von einem eigenständigen Typ der IA–Anordnung gesprochen werden muß, auch wenn er nur durch einen Fall belegt ist. Das gegenüber der Altstadt nach S vor den Ausgang des Dreisamtals verschobene Zentrum der WI tritt in keinem der bisher aufgeführten Typen auf.

Sonderfall 2: Wärmeinsel ohne Zentrum

Bei den bisher behandelten Fällen war an der IA–Anordnung jeweils ein eindeutiges WI–Zentrum zu erkennen, d. h. die höchstrangige positive IA umgrenzte nur einen sehr geringen und zusammenhängenden Anteil des gesamten Stadtgebiets. Lage und Ausdehnung dieses eigentlichen Kerns der WI waren zwar verschieden, normalerweise aber doch an die dicht bebaute Innenstadt bzw. ihre Nachbarschaft geknüpft.

Die beiden folgenden Beispiele zeigen, daß dies nicht immer der Fall sein muß. In beiden Fällen sind die Temperaturgegensätze gering und die Anordnung der IA innerhalb des Stadtgebietes erscheint mehr oder weniger wahllos, so daß von einer WI ohne Zentrum gesprochen werden kann.

Tabelle 20: Sonderfall 2

75	5. 6.73	3.41	11.9	SW/N	0.5/1.3	1	BM	3.4
84	7. 8.73	4.16	24.3	SW/SW	4.8/7.0	6	SWZ	5.3

Das erste Beispiel zeigt, daß auch bei einer klassischen Hochdruckwetterlage trotz Wolkenlosigkeit und geringer Windgeschwindigkeiten die Temperaturdifferenzierung innerhalb des Stadtgebiets gering sein kann. Zwar tritt der Nordteil der Altstadt thermisch geringfügig hervor, aber der größte Teil des Stadtgebiets weist mehr oder weniger einehitliche Temperaturen auf. Die +1° — IA umschließt zwei große Flächen, ohne daß in deren Zentren echte „Gipfel" erkennbar sind.

Noch geringere Differenzierung der Temperaturverteilung weist das IA — Bild des zweiten Beispiels auf. Ringförmige +1° IA etwa gleichen Flächeninhalts sind über das gesamte Stadtgebiet verteilt, die Altstadt tritt überhaupt nicht hervor. Die relativ hohe WI — Intensität kommt nur durch die vom Stadtrand zu den bewaldeten Hängen in seiner Nachbarschaft rasch um 3° abnehmende Temperatur zustande; innerhalb der bebauten Fläche sind die Unterschiede dagegen minimal. — In beiden Beispielen greifen die IA weit nach E in das Dreisamtal aus und schließen damit — bei allgemein geringen Temperaturgegensätzen — einen Teil des Stadtgebiets ein, der bei mehreren der o. g. Typen eine Sonderrolle spielt. Dies muß im Zusammenhang mit der bei beiden Fällen gegebenen SW—Strömung gesehen werden.

Innerhalb des hier behandelten Materials ist diese IA— Konfiguration ein Sonderfall. Das bedeutet aber nicht, daß dieser Fall nur selten vorkommt. Bei zyklonalen Wetterlagen mit bedecktem Himmel und relativ hohen Windgeschwindigkeiten ist vielmehr regelmäßig damit zu rechnen, daß die Stadt insgesamt geringfügig höhere Temperaturen als das Freiland aufweist, in sich thermisch aber nur wenig oder überhaupt nicht differenziert ist. Außer der eben behandelten Nr. 84 ist dies durch die Meßfahrten Nr. 24, 25, 48, 64, 65, 74, 80, 103, 104 und 108 (vgl. Tab. 13) belegt.

Sonderfall 3: Keine Wärmeinsel (Mittagssituation)

Einen besonderen Platz innerhalb des vorliegenden Materials nehmen die bei den Mittagsmeßfahrten gewonnenen Ergebnisse ein (Meßfahrten Nr. 4, 6, 16, 24, 26, 31, 54, 55, 58, 71, 96).

In allen Fällen ist mittags die Temperaturaufzeichnung gekennzeichnet durch kurzfristige (<1 min) Schwankungen, die in nahezu derselben Größenordnung liegen wie die Gesamtamplitude bei der entsprechenden Meßfahrt. Innerhalb der meist geringen Differenz zwischen höchster und tiefster Temperatur — in 8 der 11 o. g. Fälle zwischen 1.5° und 3.0° C — treten relativ hohe bzw. tiefe Werte während der Meßfahrt unmittelbar nebeneinander auf. Das bedeutet, daß keine großflächig charakteristischen, einzelne Stadtbereiche voneinander unterscheidenden Temperaturdifferenzierungen zu beobachten sind. Dominierend sind mehr oder weniger zufällig über das gesamte Stadtgebiet verteilte geringe Temperaturdifferenzen auf engem Raum. Auch der Gegensatz zwischen innerstädtischem Milieu und Freiland verursacht mittags keine thermische Grenze, die Struktur der Temperaturaufzeichnung ist innerhalb bebauter Gebiete und im Freiland gleich.

Das bedeutet, daß eine eigentliche städtische WI um die Zeit des Temperaturmaximums nicht existiert. Teilweise treten sogar gerade im Innenstadtbereich negative Abweichungen von der Referenztemperatur auf, während die größten positiven Abweichungen im Stadtrandgebiet häufiger sind.[31] Allerdings muß betont werden, daß dieser Befund, den ähnlich bisher nur LUDWIG (1970) mitgeteilt hat, nur für das Beobachtungsniveau 2 m über Grund gilt. Es ist damit nichts ausgesagt über eine evtl. positive Temperaturanomalie über der Stadt in größerer Höhe, z. B. oberhalb des Dachniveaus.

Wegen der geschilderten Eigenheiten der Temperaturaufzeichnungen des Mittagstermins — kleinräumige Unterschiede bei insgesamt geringer Amplitude, fehlender Stadt—Freiland—Gegensatz lassen sich aus diesem Material keine zuverlässigen und aussagekräftigen Isothermendarstellungen gewinnen.

Die Betrachtung aller IA–Einzelkarten und der Versuch, sie zu Typen zu gruppieren, kann folgendermaßen zusammengefaßt werden:

– Die Wärmeinsel der Stadt ist nach Intensität und Konfiguration sehr variabel. Der erste Punkt ist bei wechselnden Witterungsbedingungen für jede Stadt selbstverständlich und häufig beschrieben (vgl. Angaben in Abschn. A 2 und C 1), der zweite dagegen möglicherweise für Freiburg charakteristisch und nur anhand der großen Zahl von Meßfahrten nachzuweisen.

– Die sog. Normallage des WI– Zentrums, d. h. sein Zusammenfallen mit dem Bebauungsschwerpunkt Altstadt, ist nur im Ausnahmefall zu beobachten (Typ 1, eingeschränkt auch Typ 2).

– Häufigster Fall ist dagegen eine deutliche, wenn auch unterschiedlich stark ausgeprägte, Verschiebung des WI– Zentrums nach N/NW, verbunden mit einer in diesen Richtungen bis zum Stadtrand hin nur sehr allmählichen Temperaturabnahme mit meist ähnlichem Anordnungsmuster der IA (Typ 3, 4, 5).

– Eine Versetzung des WI– Zentrums gegenüber der Altstadt nach S kommt offenbar nur ganz selten vor (Sonderfall).

– Der südlich der Altstadt gelegene Teil der WI ist wenig stabil. Teilweise setzt sich die Innenstadt–WI 'normal', d. h. mit der Bebauung angepaßtem IA–Verlauf, nach S in den Stadtteil Wiehre fort (Typ 1, 3) in anderen Fällen verläuft in diesem Bereich eine N–S gerichtete thermische Grenze, die die im Dreisamtal gelegenen Stadtteile als kälter ausweist (Typ 2). Diese Grenze liegt in einer weiteren Gruppe von Fällen so weit im W, daß sich südlich der Altstadt ein Temperaturgefälle zum Stadtteil Unterwiehre ergibt (Typ 4) oder dort sogar eine Kaltluftzunge liegt, von der aus die Temperatur nach N, W und S wieder zunimmt (Typ 5).

4.2.5. Einzelbeispiele

In den vorstehenden Abschnitten 4.2.2. – 4.2.4. geht es v. a. um die Aussagen, die sich aus der vergleichenden Betrachtung der Gesamtmasse der IA–Karten ableiten lassen, wie z. B. Festlegung verschiedener WI – Typen, Bestimmung charakteristischer Grenzverläufe zwischen WI und Freiland oder charakteristischer Temperaturniveaus für einzelne Stadtteile. Im folgenden soll anhand je eines Beispiels für die ausgeschiedenen Typen etwas genauer auf die innere Struktur der WI im konkreten Einzelfall eingegangen werden. Dabei werden auch einige Hinweise auf mögliche Ursachen angegeben. Bei der Auswahl wurde versucht, trotz verschiedener WI–Typen möglichst benachbarte Meßfahrttermine zu verwenden, um so auch auf die zeitliche Entwicklung des Temperaturfeldes eingehen zu können. In der Originalarbeit sind Isothermenkarten der folgenden Meßfahrttermine enthalten (Nr. laut Tab. 13): 17, 21, 32, 34, 47, 50, 52, 56, 57, 59, 60, 61, 62, 63, 68, 71, 75, 77, 79, 81, 83, 84, 85, 86, 89, 90, 94, 95, 96, 97, 101, 102. Die für die vorliegende Fassung erforderlich gewordene Auswahl umfaßt die Karten 17 – 22 im Anhang.

Nr. 61 (Typ 1) (Karte 17) Am 22.3.1973 betrug die Temperatur an der Station E (Betzenhausen) 0.2° C. Der NE der Altstadt ist am wärmsten (3.7°C), 5 km weiter nordwestlich ist es im Mooswald 7.5° kälter. Sieht man vom Schloßberg ab, nimmt die Temperatur von der Innenstadt aus nach allen Richtungen in gleicher Weise zunächst schnell, dann nur noch allmählich ab. Dabei folgen die Isothermen annähernd den Bebauungsschwerpunkten: Die 2° – IA greift v. a. nach W aus, umfaßt den Bereich der Altstadt und Hauptbahnhof und den engverbauten Kern des Stadtteils Stühlinger und schließt auch die südliche Innenstadt sowie die dichtesten Teile der Wiehre ein. – (Eine Besonderheit ist die Ausbuchtung der 2° – IA nach Herdern. Ihr altstadtnaher Verlauf an der nur wenig westlich gelegenen Habsburgerstraße – evtl. bedingt durch relativ lockere Bebauung nahe deren Südende – führt dazu, daß beim Eintritt in die dichte Bebauung nördlich des Leopoldrings ein be-

trächtlicher Temperatursprung zum wärmsten Teil der Altstadt erfolgt.) – Auch nach E nimmt die Temperatur nur langsam ab, so daß auf Höhe des Waldsees etwa gleiche Bedingungen wie im gleich weit von der Innenstadt entfernten Industriegebiet Nord oder in Bischofslinde angetroffen werden. Auffallend ist allerdings der Gegensatz zwischen N und S der westlichen Stadtteile: Haslach und Weingarten im S bilden eine sekundäre WI, die rund 2° wärmer ist als das ähnlich bebaute Gebiet zwischen Freiburg–West und Bischofslinde. In Landwasser liegen die Temperaturen sogar unter 0° C; trotzdem stellt es eine positive Anomalie in seiner noch wesentlich kälteren (östlichen) Umgebung dar. Daß die tiefen Temperaturen im N (Flugplatz, Mooswald) auf eine offenbar nur seichte Schicht von hier stagnierender, ausstrahlungsbedingter Kaltluft zurückzuführen sind, zeigt die Tatsache, daß der gegenüber dem angrezenden Landwasser nur 30 m höhere Lehener Berg bereits positive Temperaturen aufweist.

Nr. 62 (Typ 2) (Karte 18) Bei wesentlich höherem Temperaturniveau (Station E: 9.6° C) ist am 26.3.1973 abends das Grundmuster der Temperaturverteilung bei etwas schwächer ausgeprägter Wärmeinsel dasselbe wie vier Tage zuvor am Morgen: Gleichmäßige Temperaturabnahme von der Altstadt aus nach N, W, S; S–N–Gegensatz in den westlichen Stadtteilen; scharfer thermischer Gegensatz zwischen Landwasser/Freiburg–West und Mooswald/Flugplatz. Abweichend davon setzt hier aber östlich der Verbindungslinie zwischen Schloßbergspitze und Sternwald ein rascher Temperaturrückgang ein. Auf Höhe des Waldsees ist es in diesem Fall um rund 2° kälter als in gleicher Entfernung von der Innenstadt im Industriegebiet oder in Freiburg–West. Zwischen südlicher Eschholzstraße und Haslach hat sich ein flacher Kältesee gebildet, der auf die hier weitgehend fehlende Bebauung (Schrebergartengelände) mit entsprechender Kaltluftakkumulation zurückgeführt werden kann. Für die kälteren östlichen Stadtteile kann diese Erklärung nicht angewandt werden, weil die IA hier dicht bebaute Gebiete quer teilen. Wie noch zu erläutern sein wird, kann diese Tatsache – bei normaler Lage des WI–Zentrums – mit einem wenig intensiven Bergwindeinfluß erklärt werden.

Nr. 63 (Typ 3) (Karte 19) Bis zum folgenden Morgen (27.3.1973 hat die Temperatur an Station E auf 6.2° C abgenommen. In den östlichen, westlichen und v. a. in den nördlichen Außenbezirken der Stadt hat sich an der Anordnung der IA und den jeweiligen Relationen zur Station E wenig geändert. In der weiteren Innenstadt dagegen sind die Verhältnisse jetzt anders: Von der Altstadt aus zieht ein breites Band gleichbleibend hoher Temperaturwerte fast 3 km nach NW. Es schließt nordwestliche Altstadt, Stühlinger (Nordteil), Klinikviertel und das anschließende Gebiet zwischen Elsässerstraße und Berliner Allee ein. Die mit 8° C höchste Temperatur wurde an der Kreuzung Breisacher–/Eschholzstraße westlich der Hauptbahnlinie gemessen. Diese Verteilung ist überraschend, weil in der Umgebung des Klinikviertels die Bebauung keineswegs dicht ist; vielmehr sind zwischen Eschholzstraße und Güterbahn noch große offene Flächen vorhanden. Trotzdem hat sich die WI in diesem Bereich ausgedehnt, ihr Zentrum ist nach NW verschoben.

Nr. 94 (Typ 4) (Karte 20) Bei 9.8° C an Station E, d. h. bei mit dem vorigen Beispiel fast identischen Temperaturniveau, ist am 24. 9. 1973 abends die WI besonders deutlich nach NW und N hin ausgedehnt. Die absolut höchste Temperatur (11.8° C) wurde an der Ostseite des Friedhofs südlich des Güterbahnhofs (Kreuzung Waldkircher–/Emmendingerstraße) gemessen und bis weit nach NW und N treten Temperaturen auf, die höher als in der zentralen Altstadt liegen. Vom Südende der Altstadt aus nimmt die Temperatur sehr schnell nach S ab; in großen Teilen der Mittel– und Unterwiehre ist es kälter als in Landwasser, obwohl dort ein unverändertes Temperaturgefälle zum Mooswald besteht. Durch den starken N–S–Gradient südlich der Altstadt unterscheidet sich diese Situation prinzipiell vom zuletzt genannten Beispiel. Die gesamte Südstadt, einschließlich der westlichen Stadtteile, ist jetzt kälter als die nördlich benachbarten; Weingarten hat hier nicht höhere, sondern tiefere Temperatur als Bischofslin-

Die Betrachtung aller IA–Einzelkarten und der Versuch, sie zu Typen zu gruppieren, kann folgendermaßen zusammengefaßt werden:

– Die Wärmeinsel der Stadt ist nach Intensität und Konfiguration sehr variabel. Der erste Punkt ist bei wechselnden Witterungsbedingungen für jede Stadt selbstverständlich und häufig beschrieben (vgl. Angaben in Abschn. A 2 und C 1), der zweite dagegen möglicherweise für Freiburg charakteristisch und nur anhand der großen Zahl von Meßfahrten nachzuweisen.

– Die sog. Normallage des WI– Zentrums, d. h. sein Zusammenfallen mit dem Bebauungsschwerpunkt Altstadt, ist nur im Ausnahmefall zu beobachten (Typ 1, eingeschränkt auch Typ 2).

– Häufigster Fall ist dagegen eine deutliche, wenn auch unterschiedlich stark ausgeprägte, Verschiebung des WI– Zentrums nach N/NW, verbunden mit einer in diesen Richtungen bis zum Stadtrand hin nur sehr allmählichen Temperaturabnahme mit meist ähnlichem Anordnungsmuster der IA (Typ 3, 4, 5).

– Eine Versetzung des WI– Zentrums gegenüber der Altstadt nach S kommt offenbar nur ganz selten vor (Sonderfall).

– Der südlich der Altstadt gelegene Teil der WI ist wenig stabil. Teilweise setzt sich die Innenstadt–WI 'normal', d. h. mit der Bebauung angepaßtem IA–Verlauf, nach S in den Stadtteil Wiehre fort (Typ 1, 3) in anderen Fällen verläuft in diesem Bereich eine N–S gerichtete thermische Grenze, die die im Dreisamtal gelegenen Stadtteile als kälter ausweist (Typ 2). Diese Grenze liegt in einer weiteren Gruppe von Fällen so weit im W, daß sich südlich der Altstadt ein Temperaturgefälle zum Stadtteil Unterwiehre ergibt (Typ 4) oder dort sogar eine Kaltluftzunge liegt, von der aus die Temperatur nach N, W und S wieder zunimmt (Typ 5).

4.2.5. Einzelbeispiele

In den vorstehenden Abschnitten 4.2.2. – 4.2.4. geht es v. a. um die Aussagen, die sich aus der vergleichenden Betrachtung der Gesamtmasse der IA–Karten ableiten lassen, wie z. B. Festlegung verschiedener WI – Typen, Bestimmung charakteristischer Grenzverläufe zwischen WI und Freiland oder charakteristischer Temperaturniveaus für einzelne Stadtteile. Im folgenden soll anhand je eines Beispiels für die ausgeschiedenen Typen etwas genauer auf die innere Struktur der WI im konkreten Einzelfall eingegangen werden. Dabei werden auch einige Hinweise auf mögliche Ursachen angegeben. Bei der Auswahl wurde versucht, trotz verschiedener WI–Typen möglichst benachbarte Meßfahrttermine zu verwenden, um so auch auf die zeitliche Entwicklung des Temperaturfeldes eingehen zu können. In der Originalarbeit sind Isothermenkarten der folgenden Meßfahrttermine enthalten (Nr. laut Tab. 13): 17, 21, 32, 34, 47, 50, 52, 56, 57, 59, 60, 61, 62, 63, 68, 71, 75, 77, 79, 81, 83, 84, 85, 86, 89, 90, 94, 95, 96, 97, 101, 102. Die für die vorliegende Fassung erforderlich gewordene Auswahl umfaßt die Karten 17 – 22 im Anhang.

Nr. 61 (Typ 1) (Karte 17) Am 22.3.1973 betrug die Temperatur an der Station E (Betzenhausen) 0.2° C. Der NE der Altstadt ist am wärmsten (3.7°C), 5 km weiter nordwestlich ist es im Mooswald 7.5° kälter. Sieht man vom Schloßberg ab, nimmt die Temperatur von der Innenstadt aus nach allen Richtungen in gleicher Weise zunächst schnell, dann nur noch allmählich ab. Dabei folgen die Isothermen annähernd den Bebauungsschwerpunkten: Die 2° – IA greift v. a. nach W aus, umfaßt den Bereich der Altstadt und Hauptbahnhof und den engverbauten Kern des Stadtteils Stühlinger und schließt auch die südliche Innenstadt sowie die dichtesten Teile der Wiehre ein. – (Eine Besonderheit ist die Ausbuchtung der 2° – IA nach Herdern. Ihr altstadtnaher Verlauf an der nur wenig westlich gelegenen Habsburgerstraße – evtl. bedingt durch relativ lockere Bebauung nahe deren Südende – führt dazu, daß beim Eintritt in die dichte Bebauung nördlich des Leopoldrings ein be-

trächtlicher Temperatursprung zum wärmsten Teil der Altstadt erfolgt.) – Auch nach E nimmt die Temperatur nur langsam ab, so daß auf Höhe des Waldsees etwa gleiche Bedingungen wie im gleich weit von der Innenstadt entfernten Industriegebiet Nord oder in Bischofslinde angetroffen werden. Auffallend ist allerdings der Gegensatz zwischen N und S der westlichen Stadtteile: Haslach und Weingarten im S bilden eine sekundäre WI, die rund 2° wärmer ist als das ähnlich bebaute Gebiet zwischen Freiburg–West und Bischofslinde. In Landwasser liegen die Temperaturen sogar unter 0° C; trotzdem stellt es eine positive Anomalie in seiner noch wesentlich kälteren (östlichen) Umgebung dar. Daß die tiefen Temperaturen im N (Flugplatz, Mooswald) auf eine offenbar nur seichte Schicht von hier stagnierender, ausstrahlungsbedingter Kaltluft zurückzuführen sind, zeigt die Tatsache, daß der gegenüber dem angrezenden Landwasser nur 30 m höhere Lehener Berg bereits positive Temperaturen aufweist.

Nr. 62 (Typ 2) (Karte 18) Bei wesentlich höherem Temperaturniveau (Station E: 9.6° C) ist am 26.3.1973 abends das Grundmuster der Temperaturverteilung bei etwas schwächer ausgeprägter Wärmeinsel dasselbe wie vier Tage zuvor am Morgen: Gleichmäßige Temperaturabnahme von der Altstadt aus nach N, W, S; S–N–Gegensatz in den westlichen Stadtteilen; scharfer thermischer Gegensatz zwischen Landwasser/Freiburg–West und Mooswald/Flugplatz. Abweichend davon setzt hier aber östlich der Verbindungslinie zwischen Schloßbergspitze und Sternwald ein rascher Temperaturrückgang ein. Auf Höhe des Waldsees ist es in diesem Fall um rund 2° kälter als in gleicher Entfernung von der Innenstadt im Industriegebiet oder in Freiburg–West. Zwischen südlicher Eschholzstraße und Haslach hat sich ein flacher Kältesee gebildet, der auf die hier weitgehend fehlende Bebauung (Schrebergartengelände) mit entsprechender Kaltluftakkumulation zurückgeführt werden kann. Für die kälteren östlichen Stadtteile kann diese Erklärung nicht angewandt werden, weil die IA hier dicht bebaute Gebiete quer teilen. Wie noch zu erläutern sein wird, kann diese Tatsache – bei normaler Lage des WI–Zentrums – mit einem wenig intensiven Bergwindeinfluß erklärt werden.

Nr. 63 (Typ 3) (Karte 19) Bis zum folgenden Morgen (27.3.1973 hat die Temperatur an Station E auf 6.2° C abgenommen. In den östlichen, westlichen und v. a. in den nördlichen Außenbezirken der Stadt hat sich an der Anordnung der IA und den jeweiligen Relationen zur Station E wenig geändert. In der weiteren Innenstadt dagegen sind die Verhältnisse jetzt anders: Von der Altstadt aus zieht ein breites Band gleichbleibend hoher Temperaturwerte fast 3 km nach NW. Es schließt nordwestliche Altstadt, Stühlinger (Nordteil), Klinikviertel und das anschließende Gebiet zwischen Elsässerstraße und Berliner Allee ein. Die mit 8° C höchste Temperatur wurde an der Kreuzung Breisacher–/Eschholzstraße westlich der Hauptbahnlinie gemessen. Diese Verteilung ist überraschend, weil in der Umgebung des Klinikviertels die Bebauung keineswegs dicht ist; vielmehr sind zwischen Eschholzstraße und Güterbahn noch große offene Flächen vorhanden. Trotzdem hat sich die WI in diesem Bereich ausgedehnt, ihr Zentrum ist nach NW verschoben.

Nr. 94 (Typ 4) (Karte 20) Bei 9.8° C an Station E, d. h. bei mit dem vorigen Beispiel fast identischen Temperaturniveau, ist am 24. 9. 1973 abends die WI besonders deutlich nach NW und N hin ausgedehnt. Die absolut höchste Temperatur (11.8° C) wurde an der Ostseite des Friedhofs südlich des Güterbahnhofs (Kreuzung Waldkircher–/Emmendingerstraße) gemessen und bis weit nach NW und N treten Temperaturen auf, die höher als in der zentralen Altstadt liegen. Vom Südende der Altstadt aus nimmt die Temperatur sehr schnell nach S ab; in großen Teilen der Mittel– und Unterwiehre ist es kälter als in Landwasser, obwohl dort ein unverändertes Temperaturgefälle zum Mooswald besteht. Durch den starken N–S–Gradient südlich der Altstadt unterscheidet sich diese Situation prinzipiell vom zuletzt genannten Beispiel. Die gesamte Südstadt, einschließlich der westlichen Stadtteile, ist jetzt kälter als die nördlich benachbarten; Weingarten hat hier nicht höhere, sondern tiefere Temperatur als Bischofslin-

de. Diese Verhältnisse können mit einem intensiv entwickelten abkühlenden Bergwind erklärt werden. Da bei intensiver Entwicklung der Bergwind über den östlichen Schloßberg (Hirzbergsattel) nach Herdern übergreift, ist es nicht erstaunlich, daß genau dort die Isothermen eine Ausbuchtung nach W aufweisen.

Nr. 95 (Typ 5) (Karte 21) Bis zum folgenden Morgen (25.9.1973; Station E: 7.0° C) hat sich dieselbe Situation intensiviert (d. h. Typ 4 und 5 sind nur graduell unterschieden): Schon mitten in der Altstadt setzt jetzt nach S ein kräftiger Temperaturrückgang ein und in Höhe der Dreisam ist es bereits kälter als an der Referenzstation in Betzenhausen am westlichen Stadtrand. Dasselbe gilt für ein großes zusammenhängendes Gebiet, das noch Teile der südwestlichen Innenstadt mitumfaßt und nach W (Haslach) durch höhere Temperaturen begrenzt wird. Der IA – Verlauf legt das Bild einer von E kommenden Kaltluftzunge nahe. – Die höchsten Temperaturen sind wie am Vorabend in der Nähe des Güterbahnhofs und westlich der Kliniken (Elsässerstraße) – sowie am Nordrand der Altstadt – anzutreffen, obwohl die –1° – und 0° – – IA in Freiburg–West und im Industriegebiet gegenüber dem Vorabend wesentlich weiter in Richtung Innenstadt gerückt sind.

Ähnliche Temperaturverhältnisse waren mehrfach zu beobachten (vgl. Tab. 18).
Eine nur einmal in dieser Form angetroffene Übersteigerung dieses Typs wird abschliessend vorgestellt:

Nr. 32 (Typ 5) (Karte 22) Am 5.10.1972 war abends der Temperaturgradient südlich der Innenstadt so ausgeprägt, daß der ganze N der Stadt bis weit nach wärmer war als das Zentrum der Altstadt. Zwischen dieser und der nur 1 km südlich gelegenen Kreuzung Günterstal–/Lorettostraße bestand ein Temperaturgegensatz von 8.3° C. Nach W nimmt die negative Anomalie allmählich ab. Der ungewohnte IA–Verlauf ist relativ gut abgesichert, weil bei der Messung im fraglichen Gebiet mehrere verschiedene N–S– verlaufende Straßen benutzt wurden. – Diese ungewöhnliche Situation ist zu erklären durch eine Überlagerung von Bergwind und östlicher Grundströmung (Großwetterlage SEa), die im Einflußbereich eines mitteleuropäischen Hochs trockene Festlandluft aus E brachte.

4.2.6. Zusammenfassung

Die wichtigsten Detailergebnisse wurden bereits jeweils am Ende der vorangegangenen Abschnitte zusammengefaßt (für 4.2.2. auf S. 51 u. 52, für 4.2.3. auf S. 56 u. 59, für 4.2.4 auf S. 65). Es sollen hier noch einmal kurz die Punkte zusammengestellt werden, die aufgrund wiederholter Beobachtungen einerseits als für die Temperaturverteilung im Stadtgebiet von Freiburg typisch erkannt wurden, die aber andererseits auch von Bedeutung für die allgemeine Diskussion des Phänomens Wärmeinsel sein könnten.

a) Intensität der Wärmeinsel

Unter Intensität der WI wurde die Temperaturdifferenz zwischen höchstem Wert innerhalb des Stadtgebiets (T_{max}) und geringstem im umgebenden Freiland (T_{min}) verstanden. Diese Differenz schwankt in einem weiten Bereich: Ihr größter Wert betrug 10.0° C, der geringste (nur Abend– und Morgenmeßfahrten) 0.4° C; mittags nimmt die Differenz oft sogar negative Werte an. Im Spätherbst und frühen Frühjahr treten große WI–Intensitäten besonders häufig auf, ein evtl. Jahresgang wird aber durch die auf unterschiedliche Wetterbedingungen zurückzuführende Schwankungen völlig verdeckt. Die WI–Intensitäts–Mittelwerte über alle Abend– bzw. Morgenmeßfahrten betragen 5.0° bzw. 4.8°; der Tagesgang der WI–Intensität erreicht sein Maximum in der abendlichen Abkühlungsphase, bleibt bis zum morgendlichen Temperaturminimum

aber auf annähernd gleich hohem Niveau. Dies bestätigten auch die Stationsregistrierungen und der Vergleich aufeinanderfolgender Einzelmeßfahrten.

b) Temperaturübergang zwischen Stadt und Freiland

Der thermische Gegensatz an der Grenze zwischen Stadt und Freiland ist nicht in allen Stadtteilen gleich ausgeprägt. Ein steiler horizontaler Temperaturgradient („WI—Kliff") besteht mit großer Regelmäßigkeit östlich der Altstadt (Schloßberg), südlich des Stadtteils Wiehre (Sternwald) und v. a. zwischen Landwasser/Freiburg—West und Mooswald/Flugplatz. Dagegen wirkt sich der — von der Bebauung her besonders markante — Stadtrand im SW (Weingarten/St. Georgen) in der Temperaturverteilung kaum aus.

c) Lage des Zentrums der WI

Die höchsten positiven Temperaturabweichungen gegenüber dem Freiland treten am Nordrand der Altstadt (Siegesdenkmal) oder im nördlich und nordwestlich daran anschließenden Teil der weiteren Innenstadt auf (Habsburgerstraße / Güterbahnhof / Breisacherstraße); im südlichen Teil der Altstadt kommen dagegen nur im Ausnahmefall die höchsten Temperaturen vor. Gegenüber der Altstadt als dem eindeutigen Schwerpunkt der Bebauung ist also der Kernbereich der WI im Normalfall nach NW verschoben. Aus dem Vergleich von Abend— und Morgenmeßfahrten ergibt sich, daß der Kernbereich der WI, ausgedrückt durch die Fläche, die immer eine positive Abweichung von der Temperatur am Bezugspunkt aufweist, im Laufe der Nacht seine NW—verschobene Lage beibehält, aber erheblich kleiner wird.

d) Vorkommen der geringsten Temperaturen

Tiefstwerte der Temperatur innerhalb des Stadtgebiets treten regelmäßig im Übergangsbereich zwischen Flugplatz und Mooswald auf. Nur gelegentlich kommen ähnlich tiefe Werte auch in anderen Stadtteilen vor (Nordhänge an Sternwald und in Taleinschnitten oberhalb Herdern, Wiesengelände an der Dreisam westlich Ebnet).

e) Innere Differenzierung der WI

Die Temperaturverteilung im Stadtgebiet variiert nicht nur graduell (Schwankung der WI—Intensität), sondern auch was die Relationen der verschiedenen Stadtteile untereinander anbetrifft. Insbesondere im Bereich südlich der Dreisam herrschen bei gleicher WI—Intensität ganz unterschiedliche Temperaturen in Bezug auf die übrigen Stadtteile. Der häufigste Fall ist ein innerstädtisches N—S—Gefälle der Temperatur südlich der Altstadt, das sich z. T. bis in die westlichen Stadtteile fortsetzt; es können hier aber auch den Maxima nahe Werte vorkommen. Nördlich und nordwestlich der Altstadt nimmt die Temperatur dagegen zum Stadtrand hin immer gleichmäßig ab. Ein weiteres Merkmal der innerstädtischen Temperaturdifferenzierung sind die sekundären WI— die von einigen Stadtvierteln mit großer Baumasse in einer kühleren Umgebung hervorgerufen werden. Die stabilste unter ihnen ist die von Landwasser, während das ähnlich strukturierte Weingarten z. T. deutlich, z. T. überhaupt nicht in Erscheinung tritt.

5. Diskussion der Ergebnisse

Die oben (4.2.4.) durchgeführte Gruppierung der Meßfahrtergebnisse zu verschiedenen WI—Typen ist ausschließlich nach der IA—Konfiguration vorgenommen worden. Die daraus und aus der Analyse der IA—Sammelkarten (4.2.2./3.) sowie einzelner Fälle (4.2.5.) abgeleiteten Beobachtungen sollen nun kurz im Hinblick auf einen möglichen Zusammenhang mit anderen Parametern diskutiert werden. Dabei wird versucht, die in 4.2.6. zusammengefaßten Besonderheiten zu erklären.

Die naheliegendste Frage ist die nach dem Zusammenhang zwischen der Ausbildung einer charakteristischen WI und den jeweils herrschenden meteorologischen Bedingungen. Da es hierbei weniger auf die innere Struktur der WI als auf ihr Fehlen bzw. mehr oder weniger ausgeprägtes Vorhandensein ankommt, kann die WI–Intensität als einfache Kenngröße herangezogen werden.

In Tab. 21 + 22 sind von den 108 Meßfahrten jeweils die 10 aufgeführt, die die größten bzw. geringsten WI–Intensitäten aufwiesen. Daneben sind einige aus Tab. 13 übernommene Daten angegeben.

Zusammenhänge zwischen den aufgeführten meteorologischen Parametern und der Entwicklung einer extrem starken bzw. schwachen WI werden in diesen Tabellen offensichtlich. Im folgenden wird die Beziehung zwischen WI– Intensität und Großwetterlage, Bewölkung und Windgeschwindigkeit kurz diskutiert.

Tabelle 21: Größte gemessene WI – Intensitäten

Legende:
Spalte 1: Nr. der Meßfahrt, Spalte 2: WI – Intensität in °C
Spalte 3: Großwetterlage (vgl. Erläuterung zu Tab. 13, Sp. 8a)
Spalte 4: Ziffer 1 und 2 der fünfstelligen Dezimalklassifikation des Wettergeschehens (vgl. Erläuterungen zu Tab. 13, Sp. 8c);
Spalte 5: Bewölkung in Achtel,
Spalte 6: Windgeschwindigkeit in m/sec (WA Freiburg; mehrere Ablesungen während einer Meßfahrt durch / getrennt)

1	2	3	4	5	6
10	10.0	SWa	11	–	1.2/1.2
8	9.8	Wz	44	–	3.8/6.1
32	8.8	HM	11	2	4.3
89	8.8	Wa	11	–	4.9/5.1
21	8.2	HB	31	–	1.2/2.1
7	8.1	Wz	41	–	3.6/2.7
17	8.0	TrW	44	3	4.5/1.0
22	8.0	HB	31	–	C
20	7.8	SEa	31	–	0.8/ C
19	7.3	SEa	11	1	2.6/2.7

Tabelle 22: Geringste gemessene WI – Intensitäten (ohne Mittagsmeßfahrten)

Legende wie Tabelle 21:

1	2	3	4	5	6
12	0.4	Wa	56	(Nebel)	C /0.9
64	1.0	Wz	56	8	8.7
65	1.0	Wz	56	8	4.7
67	1.0	TrW	44	8	5.1/5.4
66	1.4	TrW	44	8	4.5
45	1.5	HB	21	(Nebel)	1.6/1.5
80	1.5	Wz	74	8	7.9/9.6
25	1.6	Wz	79	8	8.6
92	1.7	HB	58	8	2.5/2.1
102	1.7	HB	11	8	1.5/1.8

Zusammenhänge zwischen den aufgeführten meteorologischen Parametern und der Entwicklung einer extrem starken bzw. schwachen WI werden in diesen Tabellen offensichtlich. Im folgenden wird die Beziehung zwischen WI–Intensität und Großwetterlage, Bewölkung und Windgeschwindigkeit kurz diskutiert.

Großwetterlage:

Das Überwiegen der Kombination von antizyklonalen Wetterlagen mit großen (7 Fälle) bzw. zyklonalen mit geringen (6 Fälle)WI – Intensitäten entspricht den Erwartungen, wonach sich klimatische Differenzierungen auf engem Raum nur bei autochthon geprägtem Witterungs geschehen ausbilden; dies ist v. a. an antizyklonale Zirkulationsverhältnisse gebunden (vgl. FLOHN 1954, S. 29 f.). Interessanter sind daher die Ausnahmen: Daß mit einer echten Hochdrucklage (HB und Wa in Tab. 22) sehr geringe WI – Intensitäten verknüpft sein können, ist leicht verständlich, da damit auch die Entstehungsbedingungen für langanhaltenden Hochnebel oder Nebel begünstigt sind. Nicht selbstverständlich ist dagegen, daß in Tab. 21 gleich zwei (allerdings zu aufeinanderfolgenden Meßfahrten gehörige) Fälle vertreten sind, die beim Inbegriff einer Zyklonallage, Wz, gemessen wurden. Der Vergleich mit der für ganz Deutschland gültigen Klassifikation des DWD (Sp. 3), die aufgrund der peripheren Lage Freiburgs gelegentlich unzutreffende Zuordnungen bewirkt, mit der für Freiburg vorgenommenen Klassifikation (Sp. 4) zeigt, daß im Oberrheingebiet meridionale Strömung mit Absinktendenz (bei Nr. 7) geherrscht hat. Auch in anderen Fällen differieren die Klassifizierungen: So wird die Lage Wz bei Nr. 64/65 in Freiburg als meridional, bei Nr. 80 und 25 als zonal eingeordnet. Diese Ungenauigkeiten zeigen, daß die Großwetterlagenklassifikation kein geeignetes Instrument ist, um die für die Ausbildung eines besonderen Stadtklimas notwendigen Bedingungen anzuzeigen.

Dies relativiert etwas die Aussage ERIKSENs (1964, S. 179), der, ausgehend von 'Großwetterlagenmitteln', nachgewiesen hat, daß sich der „Stadteffekt" bei allen Wetterlagen einstellt. ERIKSEN hatte daraus gefolgert, daß „die Behauptung, das Stadtklima sei ein 'Schönwetterphänomen' . . . berichtigt werden" müsse (S. 178). Die damit gemeinte Auffassung geht ursprünglich auf LINKE zurück („Das Stadtklima ist ein Schönwetterphänomen, das bei Windstille und wolkenlosem Himmel seine stärkste Entfaltung zeigt." LINKE u. DE RUDDER, 1940, S. 75). Sie ist jedoch durchaus zutreffend, wenn man sich anstelle des zu weit gefaßten Begriffs Stadtklima nur auf die thermischen Bedingungen bezieht und deren Zusammenhang mit dem Bewölkungsgrad, dem einfachsten Anzeiger für 'Schönwetter', betrachtet:

Bewölkungsgrad:

Der Vergleich der Spalten 3/4 und 5 in Tab. 20/21 zeigt, daß unabhängig von der Großwetterlage bei sieben der 10 größten WI–Intensitäten völlige Wolkenlosigkeit und bei allen zehn geringsten völlige Himmelsbedeckung gegeben ist. Dies unterstreicht, daß für extreme WI–Bildungen der Bewölkungsgrad von größter Bedeutung ist. Betrachtet man aber nicht nur die extremen, sondern alle Fälle (Abb. 14), zeigt sich, daß auch bei gleicher Himmelsbedeckung große Unterschiede der WI–Intensität vorhanden sind. Bei 8/8 wäre dies leicht damit zu erklären, daß diese Angabe lediglich den Bedekungsgrad des Himmels angibt, aber keine Aussage über die Art der Bewölkung enthält. Aber auch für wolkenlosen Himmel schwanken die WI–Werte zwischen 3.7° und 10.0°. Hierfür könnten jahreszeitliche Unterschiede der maximalen WI–Intensität verantwortlich gemacht werden, aber eine Überprüfung anhand Tab. 13 ergibt auch hierfür keine Regelmäßigkeit, wie die folgenden Wertepaare aus einem Sommer– und einem Herbstmonat beweisen (Meßfahrt Nr. in Klammer):

0/8,	3.7°	Juli (82)	–	0/8,	6.8°	Juli (77)
0/8,	3.9°	Oktober (30)	–	0/8,	7.2°	Oktober (29)

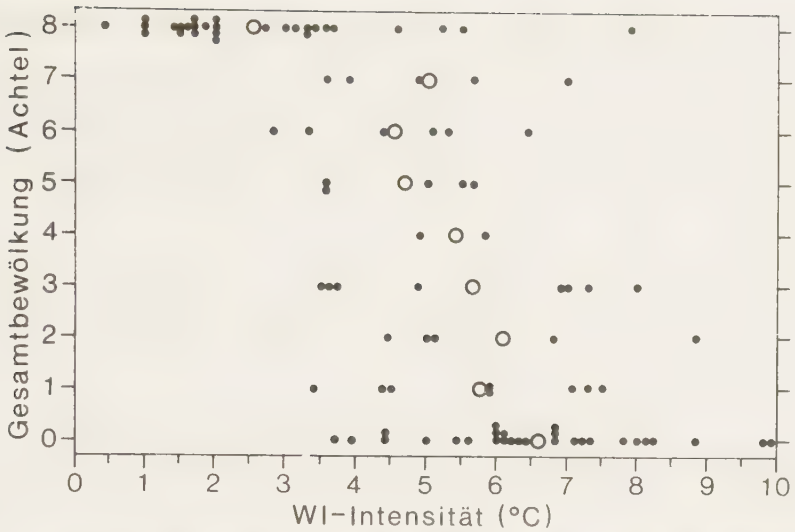


Abb. 14: Zusammenhang zwischen Wärmeinselintensität ($T_{max} - T_{min}$) und Gesamtbewölkung. Grundlage: Alle Abend– und Morgenmeßfahrten (95 Fälle, vgl. Tab. 13).
O = Klassenmittelwert jeder Bewölkungsstufe.

Es kann also davon ausgegangen werden, daß maximale Temperaturdifferenzen zwischen Stadt und Freiland nur bei wolkenlosem, minimale nur bei völlig bedecktem Himmel angetroffen werden. Auch bilden die Mittelwerte aus mehreren Beobachtungen für jede Klasse einen akzeptablen Übergang zwischen den Extremen. Aber die Schwankungen in allen Einzelklassen sind groß; eine mittlere WI–Intensität von z. B. 4.8° C kann bei jedem nur denkbaren Grad der Himmelsbedeckung vorkommen. Es erscheint deshalb wenig sinnvoll, eine lineare Beziehung zwischen Grad der Himmelsbedeckung (Gesamtbewölkung) und WI–Intensität anzugeben (SUNDBORG 1950, 1951). Die Schwankungen können nicht auf jahreszeitliche Unterschiede zurückgeführt werden. Sie lassen sich als Produkt einer Vielzahl von Einflußfaktoren auffassen, das mit den für die vorliegende Untersuchung zur Verfügung stehenden Mitteln im Einzelfall nicht aufgelöst werden kann. Auch in der Literatur gibt es zu dieser Frage kein Vergleichsmaterial, weil bei den meisten Untersuchungen von vornherein nur bei wolkenlosem Himmel Messungen durchgeführt wurden (z. B. SCHULZE 1973, OKE u. MAXWELL 1975).

Folgende Erklärungsmöglichkeit ist denkbar:
Die wesentliche Ursache der städtischen WI ist die durch das Vorherrschen von Stoffen mit hoher Wärmekapazität gegebenen Möglichkeit, Strahlungsverluste der Oberfläche per Bodenwärmestrom durch gespeicherte Wärme auszugleichen (Prinzip des Speicherofens, vgl. S. 12), so daß u. U. auch nachts der Strom fühlbarer Wärme negativ bleibt, die Luft also von Gebäuden etc. erwärmt wird (vgl. S. 13). Diese Möglichkeit hängt aber entscheidend von der vorangegangenen Energieeinnahme (Strahlungsgenuß) ab. Selbst Wolkenlosigkeit zu verschiedenen Beobachtungsterminen garantiert deshalb nicht zwangsläufig gleiche Bedingungen für die Entstehung einer WI, vielmehr kann unterschiedlicher Strahlungsgenuß in der dem Beobachtungstermin vorangegangenen Wetterperiode zu deren verschieden intensiver Ausprägung führen.

Eine weitere Erklärungsmöglichkeit kann darin gesehen werden, daß die Atmosphäre trotz Wolkenlosigkeit durch verschiedenen Wasserdampf– und Partikelgehalt wechselnde Eigen-

schaften haben kann, die insbesondere durch ihre Rückwirkung auf den langwelligen Strahlungshaushalt auch die Intensität der WI beeinflussen können.

Anhand der vorliegenden Meßdaten kann nicht über das Zutreffen der einen oder anderen Erklärungsmöglichkeit entschieden werden. Sicher ist aber, daß sich bei wolkenlosem Strahlungswetter nicht immer dieselbe WI—Intensität einstellt, deren Größe für die jeweilige Stadt typisch ist und nur noch von deren Größe, Baustruktur und Lage, evtl. auch der Jahreszeit, abhängt. Teilweise wird diese Auffassung implizit vertreten (z. B. OKE 1973).

Wind:

Windfeld und Wärmeinsel einer Stadt beeinflussen sich gegenseitig. Die Rauhigkeit der Stadtoberfläche ist verglichen mit dem Freiland groß, dadurch ist in der Stadt die Turbulenz höher, während die Windgeschwindigkeit durch erhöhte Reibung vermindert wird. Zahlreiche Untersuchungen haben dies belegt. (Neuere etwa: STEINHAUSER 1970, BOWNE u. BALL 1970, MUNN 1970, ANGELL et. al. 1971, BARTELS u. SCHARRER 1972). Fehlt ein kräftiger Gradientwind, bildet sich u. U. zwischen Stadt und Umland eine eigene thermische Zirkulation; solche Fälle wurden von POOLER (1963) oder GEORGII (1970) beschrieben. Auf die umgekehrte Einflußrichtung hat v. a. CHANDLER (1960, 1961 b) hingewiesen. Er hat gezeigt, daß der äußere Rand der städtischen WI in Nord—London bzw. in Leicester, der durch große horizontale Temperaturgradienten gekennzeichnet ist, durch den Flurwind stadteinwärts verschoben wird. Vergleichbare Schlußfolgerungen über die Modifikation der WI durch Windeinfluß können auch für Freiburg gezogen werden.

Aus Tab. 21 und 22, in denen die WI—Intensität im Mittelpunkt steht, können keine eindeutigen Schlüsse über einen Zusammenhang mit der Windgeschwindigkeit gezogen werden. Zwar treten bei zyklonalen Wetterlagen mit hohen Windgeschwindigkeiten bevorzugt geringe WI—Intensitäten auf, es gibt aber auch Ausnahmen, z. B. Nr. 8 oder auch Nr. 100 (nur in Tab. 13).

Geht man dagegen nicht von der WI—Intensität, sondern von der Lage des Zentrums der WI — bzw. den entsprechenden nach der IA—Konfiguration gebildeten Typen (4.2.4) aus, so ist eine Beziehung v. a. zur Windrichtung in einigen Fällen unübersehbar:
Unter WI—Typ 4 (S. 000) sind mit nur einer Ausnahme nur die Windrichtungen E — SE vertreten. Dasselbe gilt ohne Ausnahme für die als Typ 5 (S. 61) zusammengefaßten Meßfahrten, wodurch erneut unterstrichen wird, daß Typ 4 und 5 nur graduell unterschieden sind. Man kann deshalb davon ausgehen, daß die entsprechenden Isolinienbilder und die damit bezeichneten Temperaturverteilungen vom Vorhandensein von E — SE—Wind abhängig sind. Die E — SE—Komponente ruft ein scharfes Temperaturgefälle südlich der Altstadt und eine Nordwestverlagerung des Zentrums der WI hervor.

Ähnlich läßt sich die mit nördlichen Windrichtungen verbundene Südverlagerung des WI—Zentrums im Sonderfall eines (S. 119) leicht erklären.
Bei Typ 3 (S. 61) ist bis auf eine Ausnahme immer die Nordrichtung mit vertreten. Dies scheint der auch dort gegebenen NW—Verlagerung des WI—Zentrums zu widersprechen, auch wenn die Normallage der IA im Bereich Wiehre gut zur N—Richtung paßt.

Die Windgeschwindigkeiten sind allerdings durchweg gering. Es wird noch gezeigt (Kap. D), daß Pendelungen eines geringfügigen Windes um die Nordrichtung in der nördlichen Innenstadt (Wetteramt) mit einem entsprechend den obigen Ausführungen für die NW—Verlagerung der WI zu fordernden SE—Wind vereinbar ist.

Kennzeichen des Typs 2 (S. 60), bei dem ebenfalls die SE—Richtung überwiegt, war eine normale Anordnung der IA um die Innenstadt, verbunden mit einem Temperaturgefälle im Stadtteil Wiehre. Sieht man darin eine Vorstufe der Kaltluftzunge im Dreisamtal (Typ 4 und 5), die die zentrale WI um die Altstadt aber noch wenig stört, so ist auch hier ein Zusammenhang zwischen IA—Bild und Windrichtung zu sehen.

Typ 1 (S. 59) schließlich weist keine Verschiebung des WL–Zentrums gegenüber der Altstadt auf. Bei ganz geringen Windgeschwindigkeiten aus wechselnden Richtungen ist das ebenfalls gut verträglich mit den übrigen Beobachtungen.

Aus diesem Überblick ergibt sich, daß die Windrichtung der dominierende Faktor bei der Modifikation der WI in Freiburg ist. Insbesondere tritt die E–SE–Komponente in Erscheinung. Es kann sich dabei nur um eine Strömung handeln, die vom Schwarzwald kommend den Taleinschnitt der Dreisam benutzt, d. h. um den Bergwind des thermischen Lokalwindsystems, das in Freiburg als Höllentäler bekannt ist. Ihr an der Führung der IA ablesbarer Einfluß beschränkt sich auf den Südteil der Innenstadt und führt dort zu einer Abkühlung, die umso stärker ist, je weiter die IA–Ausbuchtung nach W reicht. Das Zentrum der WI wird auf diese Weise nach NW verlagert. Geht man von der Richtigkeit dieser Vorstellung aus, lassen sich einige weitere Eigentümlichkeiten der Temperaturverteilung in Freiburg auf einfache Weise erklären:

– Nördlich an den Bereich des E–SE–Windeinflusses schließt ein Schwachwindgebiet an (Beweis vgl. D) in dem Calmen und geringe Windgeschwindigkeiten häufig sind. Auf den großen offenen Flächen des Flugplatzes und in Teilen des Industriegebiets–Nord kann bei nächtlicher Ausstrahlung gebildeter Kaltluft ungestört akkumulieren. Sie gleitet allenfalls dem Schwemmkegelgefälle folgend in Richtung Mooswald zusammen, wo sie dann aufgestaut wird; es läßt sich morgens häufig eine Bodennebelgrenze beobachten, die SW–NE verläuft und den stadtnäheren höheren Teil des Flugplatzes nebelfrei läßt. Gleichzeitig wird die WI nach NW verlagert. So entstehen am Übergang zwischen Flugplatz und Freiburg–West – und im anschließenden Mooswald – die absolut tiefsten Temperaturen einerseits und die starken Temperaturgefälle zwischen Klinikviertel/Elsässerstraße und Flugplatz andererseits.
– Im ebenfalls für die Entstehung und Akkumulation von ausstrahlungsbedingter Kaltluft günstigen Gebiet westlich Weingarten sorgt der bis nach W vordringende E–Wind (Beweis vgl. D) für stärkere turbulente Durchmischung und für einen Transport von städtisch erwärmter Luft über die Grenzen der Bebauung hinaus, so daß hier der Rand der WI kaum feststellbar ist. (Bestätigung durch einzelne Probemeßfahrten auf dem Autobahnzubringer bis zur Ausfahrt Lehen.) Aus der unterschiedlich großen Reichweite des E–Windes ist auch zu erklären, daß sich Weingarten in manchen Fällen als sekundäre Wärmeinsel deutlich abhebt, in anderen dagegen kaum in Erscheinung tritt.
– Im E der Stadt ist der Rand der WI entlang den Hängen der begleitenden Höhen ebenfalls diffuser als in NW (Ausnahme: Nordhang am Bahnhof–Wiehre). Auch hier könnte dies auf die stärkere Durchmischung durch den – böigen – Bergwind zurückgeführt werden.
– Das gelegentlich zu beobachtende Zurückspringen der IA nördlich der Altstadt im Bereich Herdern, der den alten Kern des Dorfes Herdern als relativ kühl gegenüber seiner westlichen Umgebung ausweist, läßt sich mit dem Lokalwindsystem in Zusammenhang bringen. Bei intensiv entwickeltem Bergwind besteht die Möglichkeit des Überströmens über den mit 390 m NN gegenüber dem höchsten Teil des vorderen Schloßbergs rund 60 m niedrigeren Hirzbergsattel (Beleg vgl. D).

Freiburg liegt im Einflußbereich eines kräftigen lokalen Zirkulationssystems, das entsprechend seiner Entstehung v. a. bei den Wettersituationen wirksam wird, die auch große Temperaturgegensätze auf engem Raum hervorrufen. Es beeinflußt damit die Struktur der WI intensiv und sorgt für eine in einem Großstadtgebiet ungewöhnliche Temperaturdifferenzierung, die auch bioklimatisch relevant ist (vgl. HARLFINGER 1976).

Für die WI–Modifikation durch ein Berg–Tal–Windsystem liegen m. W. keine Vergleichsfälle vor. Ähnliche Phänomene beschrieben CHANDLER (1960, durch Stadt–Land–Gegensatz induziertes stadtwärtiges Vordringen von Kaltluftwellen), YUDCOVITCH (1966, Einfluß des 'chinook' auf die WI von Calgary) sowie PRESTON–WHYTE (1970, Einfluß des Seewindes auf die WI von Durban).

Bisher wurde die Beziehung zwischen der Ausbildung einer charakteristischen WI (Intensität und Struktur) und den jeweils herrschenden meteorologischen Bedingungen behandelt. Es bleiben einige andere Parameter zu erwähnen, denen in der Literatur ein Einfluß auf die Gestaltung der WI zugesprochen wird.

Entsprechend der weitgehend ebenen Lage der Stadt (vgl. 3.2., S. 37) ist der Einfluß der *Topographie* auf die Temperaturdifferenzierung innerhalb der Stadt gegenüber dem des Bergwindes unbedeutend bzw. nur mittelbar, insofern das Lokalwindsystem durch die topographischen Verhältnisse gelenkt wird. Bei anderen Untersuchungen, insbesondere in Städten in Kessellage, wurde dem Faktor Topographie ausschlaggebende Bedeutung für die Modifikation der WI zuerkannt (GARNETT u. BACH 1967, HAMM 1969, OKE u. HANNELL 1970, GOLDREICH 1971).

Wie bei Behandlung des thermischen Nord—Süd— bzw. West—Ost—Gegensatzes innerhalb des Stadtgebiets mehrfach betont wurde, dominiert selbst der Einfluß der *Bebauungsstruktur* bzw. der *Bodennutzung* nicht über den des Lokalwindsystems. Jedenfalls können baustrukturabhängige Details der Temperaturverteilung (z. B. sekundäre WI) noch überlagert sein von bergwindbedingten Differenzierungen. Ein Beispiel wird in Kap. D 3.4 bei Besprechung der infrarot—radiometrischen Aufnahme der Oberflächentemperaturen gegeben. (Die Aufklärung des für verschieden strukturierte Baukörper charakteristischen Ganges einzelner Klimaelemente, u. a. auch der Temperatur, erfordert eine andere, feiner auflösende Methodik. Entsprechende Untersuchungen werden in Freiburg von A. GEHRKE durchgeführt.)

In der Literatur wird diskutiert, inwieweit die *Größe der Stadt*, ausgedrückt durch die bebaute Fläche oder einfach durch die Einwohnerzahl, einen Einfluß auf die Intensität der WI hat. Es ist längst erwiesen, daß auch relativ kleine Siedlungen eine WI ausbilden können (HUTCHEON et. al. 1967, KOPEC 1970, SHARON u. KOPLOWITZ 1972, EAGLEMAN 1974) und das große Metropolen große WI—Intensitäten verursachen. Es ist aber nicht klar, ob letzteres auf die Flächenausdehnung des bebauten Gebiets oder auf die in größeren Städten meist auch größere Konzentration umfangreicher Hochbauten etc. zurückzuführen ist. Letzteres nimmt CHANDLER (1964) an, ersteres OKE (1973), der die maximale Stadt—Freiland—Differenz aus mehreren Untersuchungen in Amerika und Europa gesammelt und gegen die Größe der Stadt, ausgedrückt durch die Einwohnerzahl, aufgetragen hat. Für die europäischen Städte ergibt sich eine logarithmische Beziehung in der Form

$$WI_{max} = 2.01 \log P - 4.06$$

wobei WI_{max} die größte beobachtete Wärmeinselintensität in ^{o}C und P die Zahl der Einwohner der jeweiligen Stadt ist. Trotz der scheinbar überzeugenden Beziehung — in Abb. 5, S. 777 bei OKE (1973) scharen sich die Punkte gut um die angegebene Gerade — müssen aufgrund der Erfahrungen bei der vorliegenden Untersuchung Zweifel gegen die Aussagefähigkeit dieses Verfahrens angemeldet werden: Nachdem was über die Variabilität der WI—Intensität selbst bei scheinbar gleichen meteorologischen Bedingungen gesagt wurde, erscheint die Auswahl der Werte in der genannten Arbeit eher zufällig. Es werden dort Untersuchungen herangezogen, die auf sehr wenigen Meßfahrten basieren. Deshalb muß es auch nicht überraschen, wenn sich die vorliegenden Ergebnisse, bei denen die Wahrscheinlichkeit alle möglichen Fälle erfaßt zu haben, größer ist, nicht in die angegebene Beziehung einfügen lassen. Würde man sie auf Freiburg anwenden, dürfte die maximale WI—Intensität nur um 6.5^{o} C betragen, bzw. bei der hier tatsächlich beobachteten müßte die Einwohnerzahl jenseits 5 Millionen liegen. Da kein Grund zu sehen ist, weshalb in Freiburg eine überproportional intensive WI entstehen sollte (z. B. ungewöhnliche Freisetzung von Energie aus Verbrennungsvorgängen), kann nur gefolgert werden, daß eine so einfache Beziehung zwischen WI und Größe des Stadtgebiets nicht besteht.

Es muß noch die Frage geklärt werden, warum sich, von Ausnahmen an kalten Strahlungswettertagen im Winter abgesehen, um die *Mittags*zeit keine eigentliche Wärmeinsel einstellt, sondern im ganzen Stadtgebiet um denselben Mittelwert geringfügig schwankende Temperaturen zu beobachten sind; dies obwohl durch die starke Aufheizung der künstlichen Oberflächen und die Einschränkung verdunstender Flächen zu einem intensiven Strom fühlbarer Wärme führt (vgl. Abb. 2,S. 17). Aufgrund der Analyse von Infrarot–Scanner–Aufnahmen des Stadtgebiets von Freiburg zu drei verschiedenen Tageszeiten hat WEISCHET (1975) gezeigt, daß dies mit der tageszeitlichen Vertikalverlagerung der für die Erwärmung der Luft maßgeblichen Heizfläche erklärt werden kann. Tagsüber heizen sich v. a. die Dächer stark auf, während die Straßen in der eng verbauten Innenstadt durch Beschattung relativ kühl bleiben. Am Tag liegt damit die Heizfläche im Freiland unterhalb, in der Innenstadt aber oberhalb des für die Messung der Lufttemperatur einzuhaltenden Niveaus.

D BEITRAG ZUM PROBLEM DES HÖLLENTÄLERS

1. Vorbemerkung

Die Diskussion der Meßfahrtergebnisse hat gezeigt, daß der Wind bei der Modifikation der Temperaturverhältnisse innerhalb des Stadtgebiets eine bedeutende Rolle spielt. Insbesondere dem tagesperiodischen Lokalwindsystem, das v. a. bei den Witterungsbedingungen wirksam wird, die auch die größten thermischen Unterschiede zwischen Stadt und Freiland hervorrufen, ist zuzuschreiben, daß die Wärmeinsel Freiburgs einige charakteristische Besonderheiten aufweist, die in anderen Städten nicht anzutreffen sind. Deshalb sollen die Windverhältnisse und insbesondere das lokale Bergwindsystem dargestellt werden, insoweit es von Bedeutung für die Temperaturverteilung ist. Zwei weitere Gründe sprechen für die Einbeziehung dieses Fragenkreises: Die stadtklimatologische Untersuchung (Zusammenarbeit des DWD, des Geographischen Instituts I der Universität und anderer Institutionen, koordiniert vom Stadtplanungsamt Freiburg, FREIBURG 1974), in die auch der Beginn der vorliegenden Messungen einbezogen war, lieferte zur Frage der Windverhältnisse neues Material, das bisher nur z. T. publiziert ist (HARLFINGER 1974). Außerdem geben die Ergebnisse der WI–Untersuchungen Anlaß, die gängige Vorstellung über die thermischen Auswirkungen des Bergwindsystems einer teilweisen Revision zu unterziehen. Wegen des letzten Punktes muß ein historischer Abriß der entsprechenden Auffassungen vorangestellt werden.

2. Der 'Höllentäler' und die Geschichte seiner Beschreibung

Das für Freiburg bedeutsame Zirkulationssystem, daß sich bei windschwachem Strahlungswetter regelmäßig ausbildet, ist nach der Herkunft des abendlichen Bergwindes als 'Höllentäler' allgemein bekannt. Der ergänzende, tagsüber von der Oberrheinebene zum Schwarzwald gerichtete Talwind tritt wegen seiner geringeren Geschwindigkeiten und bioklimatischen Folgen weniger ins Bewußtsein. Es handelt sich dabei um ein normales Berg–Talwind–System (DEFANT 1949, 1951), d. h. den Hangauftrieb von Warmluft geringer Dichte bei starker Einstrahlung bzw. das Abgleiten ausstrahlungsbedingter Kaltluft während der Nachtstunden. Eine besondere Situation liegt in Freiburg allerdings aus mehreren Gründen vor:

- Am Westabbruch des Schwarzwaldes gegen den Oberrheingraben sind die Höhenunterschiede auf geringe Horizontaldistanz beträchtlich (rund 1000 m auf 10 km, vgl. auch Abschn. 3.2, S. 37)
- In das Zartener Becken östlich der Stadt münden zahlreiche Täler von N, E und S; es hat demnach als Kaltluftsammelbecken ein großes Einzugsgebiet und kann außerdem selbst als Kaltluftentstehungsgebiet wirken.
- Den Ausgang des Zartener Beckens nach W bildet eine trichterförmige Engstelle zwischen zwei Berghängen, die an der engsten Stelle in Höhe des Stadtteils Oberwiehre nur 700 m breit ist und zu einer düsenartigen Verstärkung des abendlichen Kaltluftflusses führt.

Es ist aufschlußreich, die Entwicklung der Kenntnis dieses Phänomens zu verfolgen. Die erste Beschreibung des Höllentälers und seiner Auswirkungen ist die von BAUMGÄRTNER in der 3. Aufl. von SCHREIBERs „Freiburg im Breisgau" (1840, S. 219/220)[34], nicht wie v. RUDLOFF (1951, S. 1) angibt, die von THOMAS (1884). Sie verdient Aufmerksamkeit als Beispiel reiner Beobachtungsleistung und weil sie die Auswirkungen des Höllentälers klar wiedergibt. Von einem Gast, der das Klima Freiburgs zunächst als „mild und gesund" empfindet, heißt es:

> „Es kann nicht wohl fehlen, ein oder einige Tage Aufenthalt, belehren unsern Gast auch von dem wichtigsten F e h l e r in unserm Klima. Hat er sich auf den nahen Schloßberg oder den Lorettoberg begeben und verweilt er daselbst bis zum Sonnenuntergange, so wird er plötzlich von einem rauhen Wind berührt, der von der Höhe des Schwarzwaldes in demselben Augenblick über die Gegend hinweht, als der letzte Strahl der Sonne

an dem Rande der Vogesen erlischt; und verzichtend auf den Anblick der schönen Natur sucht er Schutz in seiner Wohnung. So ist beinahe jeder Tag bei seinem Scheiden mit einer ziemlich beträchtlichen Veränderung der Temperatur verbunden, welche bei der hier entstehenden Luftströmung eintritt und besonders im Sommer fühlbar wird."

Es wird also von einer deutlichen Temperaturabnahme gesprochen. Auch die Abgrenzung der Wirksamkeit des Höllentälers ist klar beschrieben, wenn auch die Schlußfolgerungen zeitbedingt etwas biedermeierlich – empfindsam sein mögen:

„ Wegen dieses, zur Abendzeit sich erhebenden Ostwindes ist der südliche Teil der Stadt und der Umgegend, welcher an der Mündung des Kirchzartner Thales liegt, sowohl in der Vegetation um wenigstens acht Tage zurück; als auch für Schwächliche zum ständigen Aufenthalt und zum Spazierengehen weniger zuträglich als der nördliche, welcher durch die Berge mehr vor jener schädlichen Abendluft geschützt ist."

Weitere gute Beobachtungen über die Auswirkungen des Höllentälers finden sich dann in der schon genannten Arbeit von THOMAS (1884, S. 22/23). Er wird jetzt nicht mehr als Verursacher eines „rauhen Klimas" gesehen, sondern als „unser größter Wohltäter im Sommer". Zwar „verbietet sich, wenn er weht, das Sitzen im Freien. . . aber dafür kühlt er unsere Häuser während der Nacht." Ferner wird seine lufthygienische Bedeutung betont („. . . er fegt aus allen Winkeln die verdorbene Luft, die die Hitze des Tages uns gebracht hat. . .") und mitgeteilt, daß man am frühen Morgen außerhalb der Stadt „ die köstliche Luft des Schwarzwaldes genießen" kann. Auch die Art der Entstehung, die Tagesperiodik und die Funktion des Zartener Beckens als Sammelbecken wird richtig beschrieben. – Bis zur Jahrhundertwende war also, ohne Meßdaten, eine Fülle zutreffender Beobachtungen akkumuliert. Sie sind jedoch wenig bekannt und wurden deshalb etwas ausführlich zitiert.

Allerdings findet sich bei THOMAS (1884, S. 23) auch erstmals ein Hinweis, der die Vorstellungen über die thermischen Auswirkungen des Höllentälers bis heute beeinflußt hat: Mit der Bemerkung „übrigens meine man nicht, daß er, wie er erscheint, wirklich kühl sei" beginnt der Versuch einer „Ehrenrettung unseres Höllenwindes", die Richtiges mit nicht gesicherten Vermutungen verbindet. Ausgehend von der Tatsache, daß „bewegte Luft, die kühler ist als unsere Haut . . . uns kühler (erscheint) als unbewegte" (höhere Abkühlungsgröße), d. h. ein in Bezug auf die vorhandene ruhende Luftmasse relativ warmer Wind durch größeren Wärmeentzug u. U. als kühl empfunden werden kann, kommt THOMAS zu dem nicht belegten Schluß, daß der Höllentäler temperaturerhöhend wirken müsse. Der einzige 'Beweis' ist indirekt: Wirkte der Bergwind abkühlend, „ so könnten unsere Sommermittel nicht so hoch sein." Hier macht sich der Mangel an Instrumentenbeobachtungen bemerkbar, denn THOMAS geht in seiner Vermutung offensichtlich stark von der Theorie aus. Mit dem Auftakt „ so muß es ja auch sein" begründet er die vermutete Temperaturerhöhung implizit durch adiabatische Erwärmung beim Absinken. Umso erstaunlicher ist es, daß dies Hypothese bis in die jüngste Zeit ungeprüft überdauert hat. Die späteren Untersuchungen sind z. T. mehr Versuche, für die als richtig akzeptierte Theorie neue Belege zu sammeln, als unbefangene Prüfungen einer Hypothese.

Die weiteren Schritte sind folgende: SCHULTHEISS (1896) veröffentlicht eine Häufigkeitstabelle der Windrichtungen für die bis 1890 im jetzigen Rathaus gelegene Station. Sie zeigt häufigeren Höllentälereinfluß (z. B. weniger Calmen) als die nach 1890 benutzte meteorologische Station in der Hebelstraße (heutiges Geologisch/Mineralogisches Institut). THOMAS (1904, S. 52/53) beruft sich auf SCHULTHEISS und wiederholt seine frühere Vermutung, „ daß der Höllentalwind als Fallwind um etwa 1/2° höhere Wärmewerte erzeugt, als sie ohne ihn vorhanden sein würden . . . und daß er gleich dem Föhn ein verhältnismäßig sehr trockener Wind ist – ein Ergebnis, welches der täglichen Erfahrung vollkommen entspricht." Hier gerät also die 20 Jahre früher anders und richtig beschriebene 'tägliche Erfahrung' bereits zugunsten einer vorgefaßten Theorie in Vergessenheit. Neue Messungen liegen nicht vor. Im selben Sinne, sehr bestimmt, aber ohne Belege, äußert sich dann PFLÜGER (1933). Auch

LOSSNITZER (1942) übernimmt diese Vorstellungen, präzisiert sie verbal, teilt aber ebenfalls keine konkreten Meßergebnisse mit. Er behauptet als Erster, daß sich der Höllentäler – und auch die abendlichen Hangwinde in Herdern – unmittelbar in der Aufzeichnung von Thermohygrographen nachweisen lassen. Selbst auf dem Flugplatz sollen die Luftschübe von den Hängen östlich Herdern „in der Temperatur – und Feuchteregistrierung deutlich nachweisbar (sein), auch wenn sie in der Windrestrierung nur schwach zu erkennen sind" (S. 39). Jede rhythmische Temperatur– und Feuchteschwankung während der abendlichen Abkühlungsphase wird offensichtlich als Bergwindeffekt gedeutet, selbst wenn dieser mit dem Anemometer nicht feststellbar ist. Zwar wird einschränkend anerkannt, daß

> „ der Höllentäler und die übrigen um Freiburg auftretenden Bergwinde an sich zwar aus den Tälern herausdrängende und von den Hängen abgleitende Kaltluftmassen darstellen, die dynamisch wahrscheinlich nur wenig erwärmt und getrocknet werden" (S. 39),

trotzdem sollen sie gegenüber der ausstrahlungsbedingten Kaltluft in der Rheinebene Temperaturanstieg und Feuchterückgang bewirken. Sie sollen sogar eine „Abdrängung des Stadtkaltluftsees nach Westen" (S. 40) bewirken, was mit den in Kapitel C vorgestellten Meßergebnissen besonders schlecht in Einklang zu bringen ist. (Als naheliegender Einwand gegen diese Vorstellung läßt sich die Frage anführen, warum der warme Fallwind nicht auf die schwerere Bodenkaltluft im Stadtgebiet aufgleitet; dann dürfte vom Bergwindeintritt am Boden nichts zu spüren sein.) Auch bei LOSSNITZER ist damit ein Theorieüberhang unverkennbar. Ohne eine Zahl oder Abbildung anzuführen, meint er, mit der skizzierten Darstellung sei „ der immer wieder empfundene Widerspruch zwischen zahlenmäßiger klimatologischer Feststellung und tatsächlicher Empfindung . . . hinreichend aufgeklärt." (S. 40)

Als Erster hat dann v. RUDLOFF (1951) neue Beobachtungen zum Phänomen Höllentäler zusammengetragen. Er gibt zahlreiche Hinweise auf die Windstärke, die Eintrittszeit des Bergwindes, die jahreszeitliche Verteilung seiner Häufigkeit, sogar seine vertikale Mächtigkeit (aus Beobachtungen vom höher gelegenen Schloßberg aus), weiterhin auf die Rolle des Hirzbergsattels (östl. Schloßberg) für das Überströmen nach Herdern. Allerdings kann auch hier nicht auf eine eigentliche Windmessung (Richtung und Geschwindigkeit) zurückgegriffen werden, und so ist nicht ganz klar, ob die minutengenauen Eintrittszeiten und die daraus berechneten Laufzeiten zwischen verschiedenen Stationen bzw. die Durchschnittsgeschwindigkeiten auf Augenbeobachtungen oder der Interpretation von Thermographenregistrierungen beruhen.

An der Überzeugung, daß der Bergwindeintritt an einer Temperaturerhöhung erkennbar sein müsse, hält jedenfalls auch v. RUDLOFF (1951, 1956) fest. Er beziffert den durch Bergwind bedingten Temperaturanstieg auf 1 – 2° C, bei überlagerter Süd– oder Südostströmung auch 4 – 8° C und gibt dazu ein Besipiel (1951, S. 6, Abb. 10): Der abgebildete Registrierstreifen der Station Kirchzarten vom 22. – 24.8.1944 soll die Temperaturzu– und Feuchteabnahme durch Bergwind zeigen. Am 22.8. geht die Temperatur nach 19 Uhr schnell von 30° auf 22° zurück, steigt ab etwa 21.30 Uhr wieder auf 28° an und bleibt bis zum nächsten Morgen 8 Uhr etwa gleich. Lange nach Sonnenaufgang fällt die Temperatur dann noch einmal um 4°, bevor der normale Anstieg wieder einsetzt. In der folgenden Nacht fehlt der entsprechende Temperaturanstieg, es ist lediglich eine verzögerte Abkühlung zwischen 22 und 02 Uhr zu beobachten, das Minimum liegt jedoch über 10° tiefer als am 22.8.. Angesichts der außerordentlich hohen Nachttemperatur, des für einen Strahlungswettertag insgesamt ungewöhnlichen Temperaturganges und der fehlenden Wiederholung am folgenden Tag fällt es schwer, den geschilderten Temperaturverlauf als Ergebnis lokaler Klimafaktoren anzusehen.

Auch eine weitere Abbildung (1951, S. 10, Abb. 11), die den Temperaturgang in Freiburg (an der dem Höllental abgewandten Westseite des Lorettoberges) vom 12.8. – 18.8.47 zeigt, muß nicht unbedingt als eine Bestätigung der vorgetragenen Auffassung angesehen

werden: Bei dem typischen Gang einer Woche mit Strahlungswetter setzt hier jeweils kurz vor 18 Uhr ein scharfer Temperaturabfall ein. Gegen 24 Uhr (in einem Fall schon um 21.30 Uhr) ist dann ein unterschiedlich starker Anstieg zu verzeichnen, der als Bergwindeinfluß gekennzeichnet ist. Selbstverständlich können diese 'Zacken' mit lokalen Strömungen zu tun haben. Aber es muß gefragt werden, warum bei einer mittleren Eintrittszeit von 20.25 Uhr (August, Zasiusstraße, lt. Tab. 1, S. 8 derselben Arbeit) die temperaturerhöhende Wirkung erst um 24 Uhr einsetzt. Könnte nicht auch umgekehrt geschlossen werden, daß diese Abweichungen zu hohen Temperaturen hin dadurch zustande kommen, daß die bis dahin deutliche Abkühlung unterbrochen wird, weil der kühlende Bergwind zeitweise stagniert? Ohne die Kombination von Wind– und Temperaturmessungen ist diese Frage nicht zu beantworten.

Die Entwicklung der Kenntnis des Höllentälers wurde ausführlich behandelt, weil sie m. E. exemplarisch zeigt, wie zur Erklärung unbezweifelbarer Beobachtungen herangezogene Hypothesen u. U. eine solche Eigendynamik entwickeln, daß sie auch ohne Bestätigung als gültig akzeptiert und durch weniger unbezweifelbares Beobachtungsmaterial gestützt werden.

3. Die Windverhältnisse in Freiburg nach neueren Untersuchungen

Trotz der zahlreichen Beschäftigungen mit dem Höllentäler liegen bis Anfang der 70er Jahre keine echten Windmessungen vor, ausgenommen die Böenuntersuchung zwischen Flugplatz und Mooswald durch SCHMIDT (1933). Was den Höllentäler betrifft sind folgende Fragen offen:

– Ist die Vorstellung einer temperaturerhöhenden Wirkung richtig?
– Wie weit reicht sein Einflußbereich nach W durch das bebaute Gebiet hindurch?
– Liegt auch der nördlich der Dreisam gelegene Teil der Stadt in seinem Einflußbereich?
– Wie vollzieht sich der Übergang von Talauf– zu Bergwind?
– Wie wirkt der ergänzende Talwind?
– Wie hoch reicht der Höllentäler, wie sieht das Windprofil aus?

Im Rahmen der auf S. 76 genannten stadtklimatologischen Untersuchung wurde ein Meßnetz eingerichtet, das Daten zur Beantwortung einiger dieser Fragen liefern sollte.

Insgesamt wurden neun WOELFLE–Windschreiber im Stadtgebiet postiert, so daß zusammen mit dem Wetteramt zehn Stationen von August 1971 bis Ende 1972 zur Verfügung standen. Die beiden dem Geographischen Institut I gehörenden Geräte wurden danach noch weiter betrieben. Zusätzlich wurden vom Aerologischen Meßtrupp des DWD (Leitung: Reg.Dir. JURKSCH) Fessel– und Pilotballonaufstiege durchgeführt. – Die Lage der in Karte 23 dargestellten Stationen ist folgende (später verwendete Kurzform kursiv):

1: *Haid,* identisch mit Station F (vgl. Tab. 11 bzw. Abb. 8), (Stahlrohrmast 6 m)
2: Dach des *Weinbauinstituts,* Merzhauserstraße am Westhang des Lorettoberges.
3: Turm der *Feuerwache,* Eschholzstraße 118
4: Dach des Städt. *Fuhrparks,* Elsässerstraße 17, 400 m westlich Friedhof bzw. Südende des Flugplatzes.
5: Dach der *Kläranlage* Nord, Mooswaldallee, nördlich des Industriegebiets.
6: Dach des Droste–Hülshoff–Gymnasiums, Brucknerstr. 2, Herdern
7: *Bismarckturm,* oberer Schloßberg, 390 m NN, 110 m über Innenstadtniveau (nur in Abb. 20)
8: Turm der Brauerei *Ganter,* Schwarzwaldstraße 43, Oberwiehre
9: Wasserwerk *Ebnet,* offenes Gelände östlich des Ortes (Stahlrohrgestell 6 m)

3.1. Die mittlere Windverteilung (Karte 23)

Mit dem o. g. Meßnetz konnte erstmals die Differenzierung der Windverhältnisse im Stadtgebiet direkt nachgewiesen werden. Die in Karte 23 dargestellte mittlere Windverteilung zwischen August 1971 und Juli 1972 wird hier nur in Stichworten zusammengefaßt; sie ist etwas ausführlicher von HARLFINGER (1974, S. 17 – 19) dargestellt worden:

- Die in der Oberrheinebene normalerweise überwiegende SW–Komponente (SSW–SW–WSW) dominiert mit 23 – 37 % nur an den am westlichen Stadtrand gelegenen Stationen 1, und 5; entsprechend ihrer Ursache (zyklonales Witterungsgeschehen) sind die Windgeschwindigkeiten dabei hoch.
- Die Stationen 2 und 6 liegen an N – S – streichenden Hängen. Der hier relativ hone Anteil der Südkomponente kann als orographisch bedingte Umlenkung des SW–Windes aufgefaßt werden. (Nachweis vgl. Ende des Abschnitts 3.2.).
- Alle Stationen, mit Ausnahme der beiden im Dreisamtal gelegenen (8, 9), weisen einen hohen (< 15 %) Anteil N– und NNW– Wind auf, wie er bei Hochdruckwetterlagen in der genzen Oberrheinebene regelmäßig auftritt.
- An allen Stationen im Dreisamtal und westlich vor seiner Öffnung ist der E/ESE–Windanteil hoch; an Station 8 dominiert er mit 37 % alle anderen Richtungen. (Reine Ostlagen, die sich aufgrund der Geländegestalt hier auswirken könnten, sind weniger häufig.) Das lokale Zirkulationssystem kommt also auch in der Mitteilung über alle Wetterlagen deutlich zum Ausdruck.
- Der Vergleich der Stationen 9 und 8 zeigt den orographischen Düseneffekt zwischen Ebnet und Wiehre: Zunächst E/ESE/SE–Wind mit <2 m/sec, dann Konzentration auf eine Richtung (E) und höhere Windgeschwindigkeit.
- Im Dreisamtal und vor seinem Ausgang gibt es praktisch keine Windruhe: Die Calmenhäufigkeit beträgt maximal 0.4 %. Der Nord– und Nordwestteil der Stadt weisen dagegen mit 3.8 bzw. 6 % einen hohen Calmenanteil auf. Dasselbe Ergebnis zeigt auch die mittlere Windverteilung an der Station 4 für den Zeitraum 1952 – 1960 (in %o, nach SCHIRMER 1969):

N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Windstille
130	64	25	21	108	304	15	37	296

Bereits die mittleren Windverhältnisse zeigen eine Differenzierung im Stadtgebiet, die mit den im Teil C geschilderten Ergebnissen in Zusammenhang zu bringen ist und die dort gezogenen Schlußfolgerungen stützen kann: Es ist offensichtlich, daß sich der Ostwindeinfluß, der zur Erklärung der Verschiebung des WI–Zentrums und des Temperaturgefälles südlich der Altstadt herangezogen wurde, auf den südlich der Dreisam gelegenen Teil der Stadt beschränkt.

3.2. Die tagesperiodische Änderung des Windfeldes

Aus den mittleren Windverhältnissen lassen sich Bereiche mit unterschiedlicher Häufigkeit verschiedener Windrichtungen ablesen, die flächenhafte Verteilung von Windrichtung und –geschwindigkeit für einen konkreten Zeitpunkt ist aber nicht zu entnehmen. Nur damit läßt sich aber die Frage nach der Reichweite und Abgrenzung des Höllentälers schlüssig beantworten. Im folgenden wird deshalb die Variation des Windfeldes in kurzen Zeitintervallen (1 Stunde) vorgestellt.

Dazu wurde ein Plotter–Programm entwickelt, das die Stundenmittelwerte für Windrichtung und –geschwindigkeit der neun o. g. Stationen in einem groben Geländeumriß lagerichtig

als Windvektoren wiedergibt. Die im Kopf der Einzeldiagramme erscheinenden Uhrzeiten bezeichnen jeweils das Mittel für die folgende Stunde (z. B. 23 Uhr = Mittel 23 . . . 24 Uhr). Die Lage und Bezeichnung der Stationen entspricht Karte 23.

Abb. 15 a – f zeigt das Windfeld des 9.3.1972. Trotz der Großwetterlage TrW war an diesem Tag das lokale Zirkulationssystem gut entwickelt, allerdings nicht mit maximalen Windgeschwindigkeiten.

Um *0 Uhr* ist der Bergwind an 4 Stationen deutlich ausgebildet. Von Ebnet (9) nimmt seine Geschwindigkeit zur Engstelle zwischen Schloßberg und Sternwald hin zu, wobei der höher gelegene Bismarckturm (7) mit 4 m/sec etwas höhere Windgeschwindigkeit aufweist als die Station Ganter (8). Der Einfluß des Höllentälers reicht bis zur Feuerwache (3). Dort ist die Geschwindigkeit wieder etwas geringer, was durch Reibungseinfluß und Strömungsdivergenz erklärt werden kann. An den Stationen 1,2 und 4 ist es nahezu, an der Kläranlage (5) sogar völlig windstill. Am Droste–Gymnasium (6) herrscht ein leichter hangabwärts gerichteter Wind. Um 1 Uhr ist die Situation, bis auf Richtungsänderungen an Stationen mit schwachem Wind, nur wenig verändert. Eine Stunde später (*2 Uhr*) ist der Bergwind verstärkt, (Ganter 4.0, Bismarckturm 4.6 m/sec) und hat sich bis zur Station Haid (1) an der Südwestgrenze der Stadt gegen das Freiland durchgesetzt. Die Ostströmung ist außer im Dreisamtal auch in allen westlich daran anschließenden Stadtteilen wirksam, nicht dagegen in dem nordwestlich an die Altstadt anschließenden Bereich, wie das folgende Diagramm (*3 Uhr*) zeigt: Bei unverändertem Höllentäler hat sich an den Stationen 4 und 5 schwache NNW–Strömung eingestellt. *4 Uhr* bringt eine erneute Intensivierung des Bergwindes, und zwar weniger an den schon zuvor hohe Windgeschwindigkeiten aufweisenden Stationen 7 und 8 als an den westlichen (1, 3); d. h. die Geschwindigkeitszunahme setzt sich nach W durch. Kurzfristig scheint der vom Bergwind am Ausgang des Dreisamtals ausgehende Einfluß offenbar auch nach NW durch die Innenstadt durchgreifen zu können. Um *6 Uhr* ist der E – Wind in der südlichen Innenstadt bis hinaus zur Station 1 noch voll entwickelt. In der Stunde nach *7 Uhr* läßt an den innenstadtnahen Stationen (3, 7, 8) die Geschwindigkeit des Höllentälers bei gleichbleibender Richtung stark nach, bei 1, 4 und 6 hat bereits eine Richtungsumkehr bergwärts stattgefunden. Die beiden letztgenannten Diagramme und v. a. das von *8 Uhr* zeigen, daß die Geschwindigkeitsabnahme an der höher gelegenen Station Bismarckturm (7) früher und intensiver einsetzt, als an der benachbarten Station 8. Das kann so gedeutet werden, daß der Höllentäler gegen Morgen an Mächtigkeit verliert, bzw. daß der tagsüber ausgebildete Talwind den am Boden noch intakten Bergwind in der Höhe überlagert und sich von oben gegen ihn durchsetzt.

Um *9 Uhr* hat sich dann an 8 Stationen eine bergwärts gerichtete Strömung aus N oder NW ausgebildet. Nur in Ebnet (9) ist noch ein Rest von 'Höllentäler' festzustellen. Eine Stunde später (*10 Uhr*) hat sich auch hier der Talwind durchgesetzt. Den ganzen Tag über *11 . . . 17 Uhr)* ändert sich an dieser Situation wenig. Im Westen der Stadt überwiegt reiner Nordwind, hangnäher ist ein Eindrehen auf NNW bis NW zu beobachten. In Ebnet wirkt sich, obwohl die Station selbst völlig frei liegt, die orographische Führung durch das W–E gerichtete Dreisamtal aus; hier kommt der Talwind aus WNW. Die Geschwindigkeiten liegen im genannten Zeitraum durchweg zwischen 1.5 und 3.0 m/sec. Interessant ist, daß die jeweils höchsten Werte (3.6 m/sec) mehrfach in Ebnet auftreten; gewissermaßen ein Düseneffekt mit umgekehrtem Vorzeichen.

In der Stunde nach *18 Uhr* vollzieht sich dann wieder ein grundsätzlicher Wandel des Windfeldes. In den westlichen Stadtteilen herrscht, bei verringerter Geschwindigkeit, noch die Nordkomponente vor, an den hangnahen Stationen 2, 6, 7 und 8 überwiegt aber die SE–Richtung. Da in Ebnet noch Talwind vorliegt, kann dies nur als kleinsträumige lokale Hangzirkulation verstanden werden, zumal auch die Geschwindigkeiten unbedeutend sind. Etwas später (*19 Uhr*) hat sich dann an allen Stationen im Südteil der Stadt wieder die für die Nacht typische E–Richtung durchgesetzt; Der Höllentäler reicht wieder bis an den West-

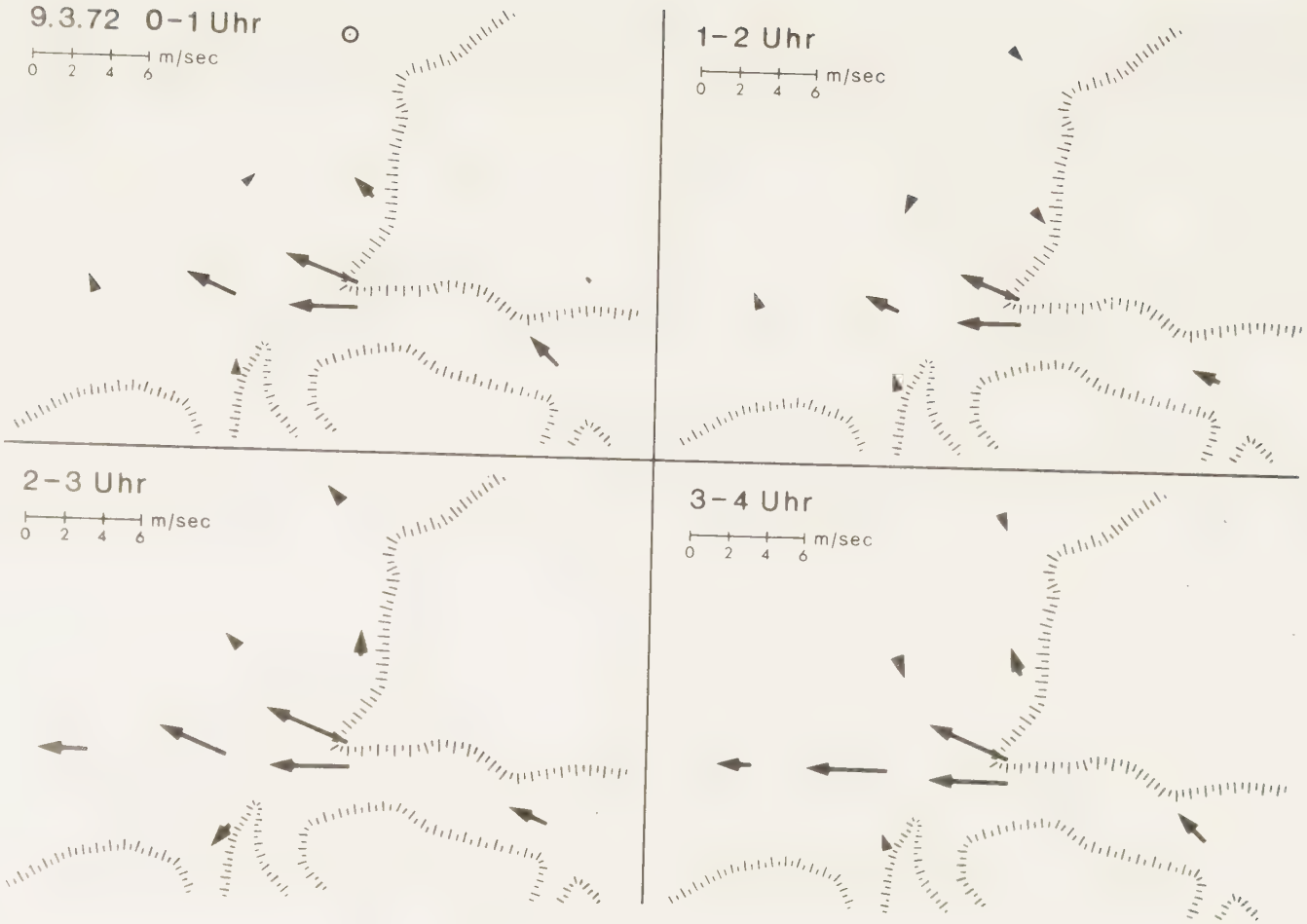
rand der Stadt (1). Am Fuhrpark (4) dagegen ist es jetzt wieder nahezu windstill. In den folgenden Stunden (*20 . . . 23 Uhr*) bleibt diese Situation im wesentlichen erhalten. Lediglich die Reichweite des Höllentälers nach W variiert: Um 22 Uhr ist sein Einfluß an den Stationen 1 und 3 gegenüber der vorangegangenen und der folgenden Stunde reduziert. Um 23 Uhr hat sich dann wieder ein Windfeld eingestellt, das der Situation um 5 Uhr gleicht.

Gleichartige Ausdrucke mit je 24 Diagrammen wurden außer für den 9.3.1972 (TrW) auch für 20.9.1971 (BM), 15.12.1971 (SWa), 20.1.1972 (Ww) und 16.2.1972 (TrW) hergestellt. Sie zeigen mit nur geringen Abweichungen denselben tagesperiodischen Wechsel des Windfeldes. Es kann damit als sicher gelten, daß das hier vorgestellte Zirkulationsmuster kein Einzelfall ist, sondern bei Höllentäler—Situationen immer in dieser Form entwickelt ist. Außerdem wird deutlich, daß der Höllentäler auch während der kalten Jahreszeit — freilich weniger ausgeprägt als im Sommer (vgl. HARLFINGER 1976, S. 16, Tab. 2) — normal entwickelt ist und eine Differenzierung des Stadtgebietes hinsichtlich der Windverteilung hervorruft. Ferner ergibt sich, daß das Vorhandensein des Höllentälers nicht an ausgesprochenen Hochdruckwetterlagen gebunden ist; vielmehr kann er sich, wie die oben in Klammern angegebenen Großwetterlagen zeigen, auch bei anderen Zirkulationstypen ausbilden, vorausgesetzt in der näheren Umgebung gestatten die Wetterverhältnisse durch den Wechsel von Ein— und Ausstrahlung größere Tagesamplituden der Oberflächentemperaturen.

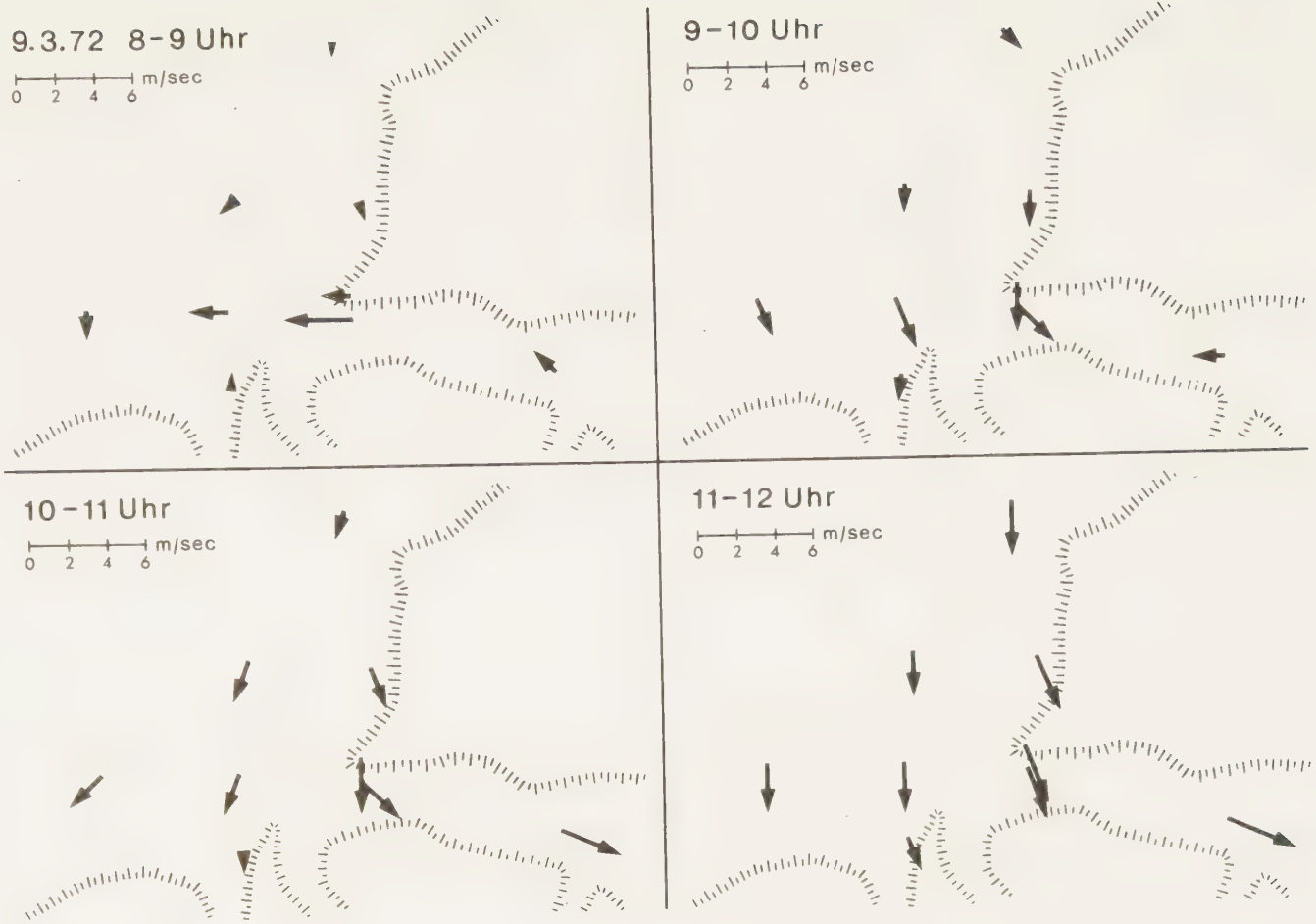
Zu Vergleichszwecken wurden entsprechende Diagramme des Windfeldes auch für zwei Tage mit ausgeprägtem zyklonalem Westwetter (18.10.71, Wz und 12.2.72, Ww) ausgedruckt. Die Windverteilung im Stadtgebiet ist ganz vom SW—Wind (bis knapp 10 m/sec) geprägt und ändert sich im Laufe des Tages nur geringfügig, so daß 4 Einzeldiagramme zur Illustration genügen (Abb. 15 g). Aus dieser Verteilung geht hervor, daß die auch in den mittleren Verhältnissen auftretende Südkomponente an den Stationen 2 und 6 tatsächlich ein orographisch umgelenkter SW—Wind ist.

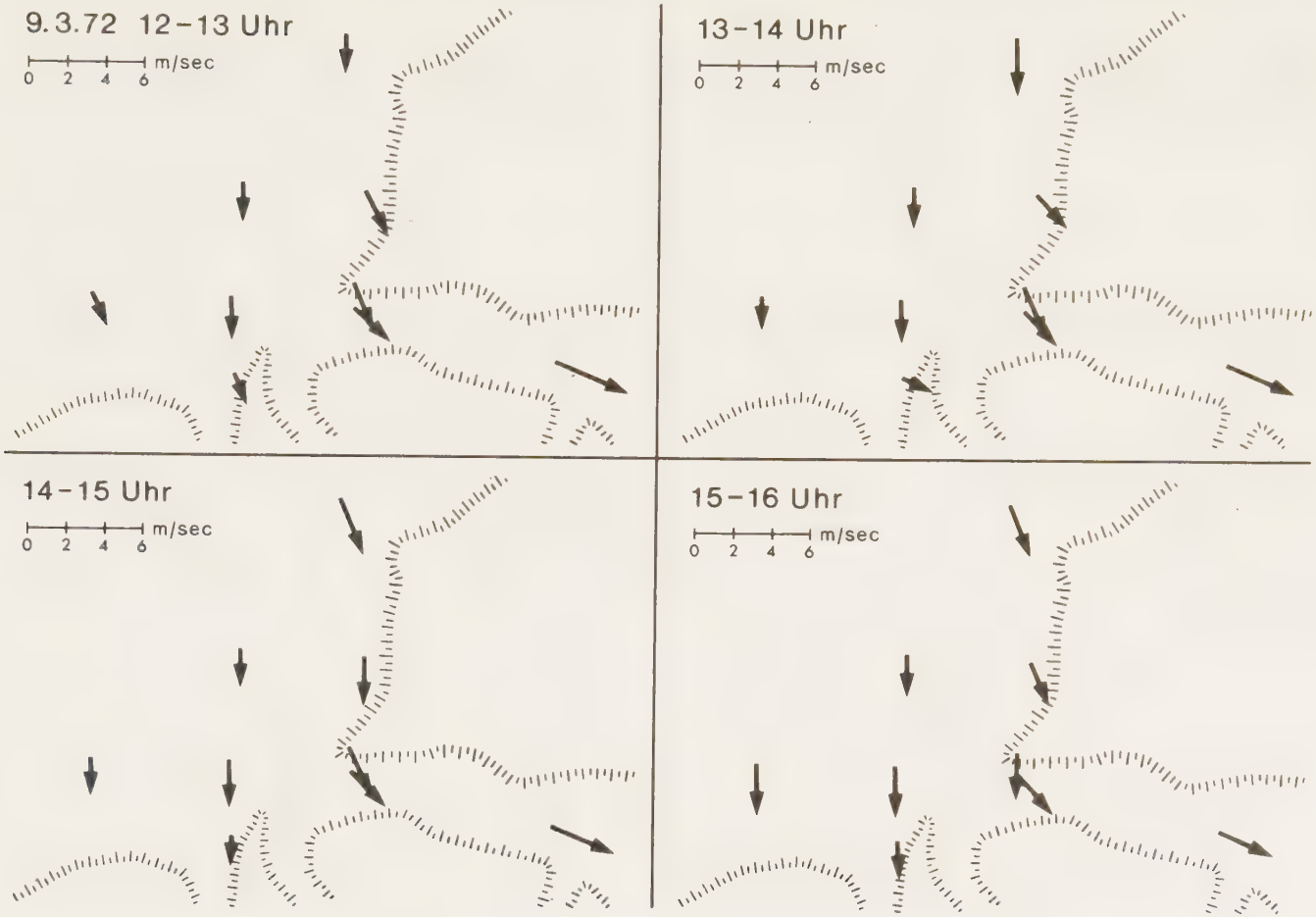
Abschließend werden die für die Diskussion der WI—Anordnung wichtigen Charakteristika der Windverteilung unter dem Einfluß des Lokal—Windsystems zusammengefaßt:

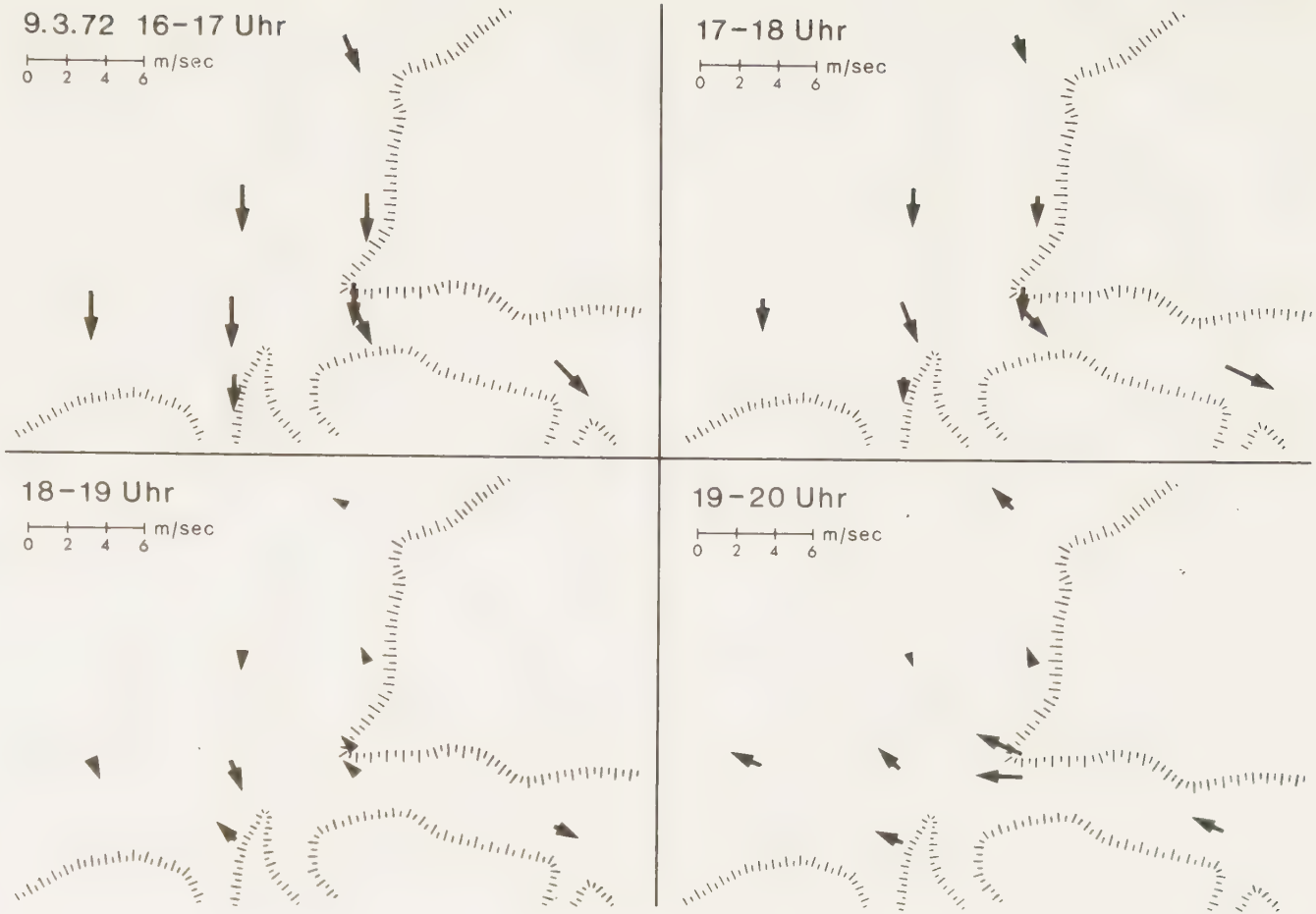
- Der vor Sonnenuntergang einsetzende Bergwind beeinflußt die Stadtteile im Dreisamtal und die westlich vor dessen Ausgang in der Rheinebene — also südlich der Altstadt — gelegenen. Im Laufe der Nacht setzt er sich bis an den Westrand der Stadt (Gewerbegebiet Haid) durch, flaut hier aber gelegentlich auch während der Nacht wieder ab.
- Nordwestlich der Innenstadt existiert ein ausgesprochenes Schwachwindgebiet, das sich außerhalb der Hangzone bis weit nach N (Industriegebiet) erstreckt. Hier herrschen Calmen oder ganz geringe Windgeschwindigkeiten (<1 m/sec), während 2 km weiter südlich Ostwind mit >4 m/sec vorhanden ist. Der Höllentäler—Einfluß beschränkt sich also i. d.R. auf den Bereich südlich der Altstadt, diese selbst liegt im Lee.
- Bei intensiver Entwicklung greift der Bergwindeinfluß auch über die Innenstadt bis zum Flugplatz (Station 4) aus. Er überströmt dann den westlichen Teil des Schloßberges (7) und den Hirzbergsattel am hinteren Schloßberg (6) und führt in der nördlichen Innenstadt zu einer Luftversetzung nach NW.
- Tagsüber herrscht schwacher Nordwind, der zum Dreisamtal hin durch die Talhänge auf NW abgelenkt wird.

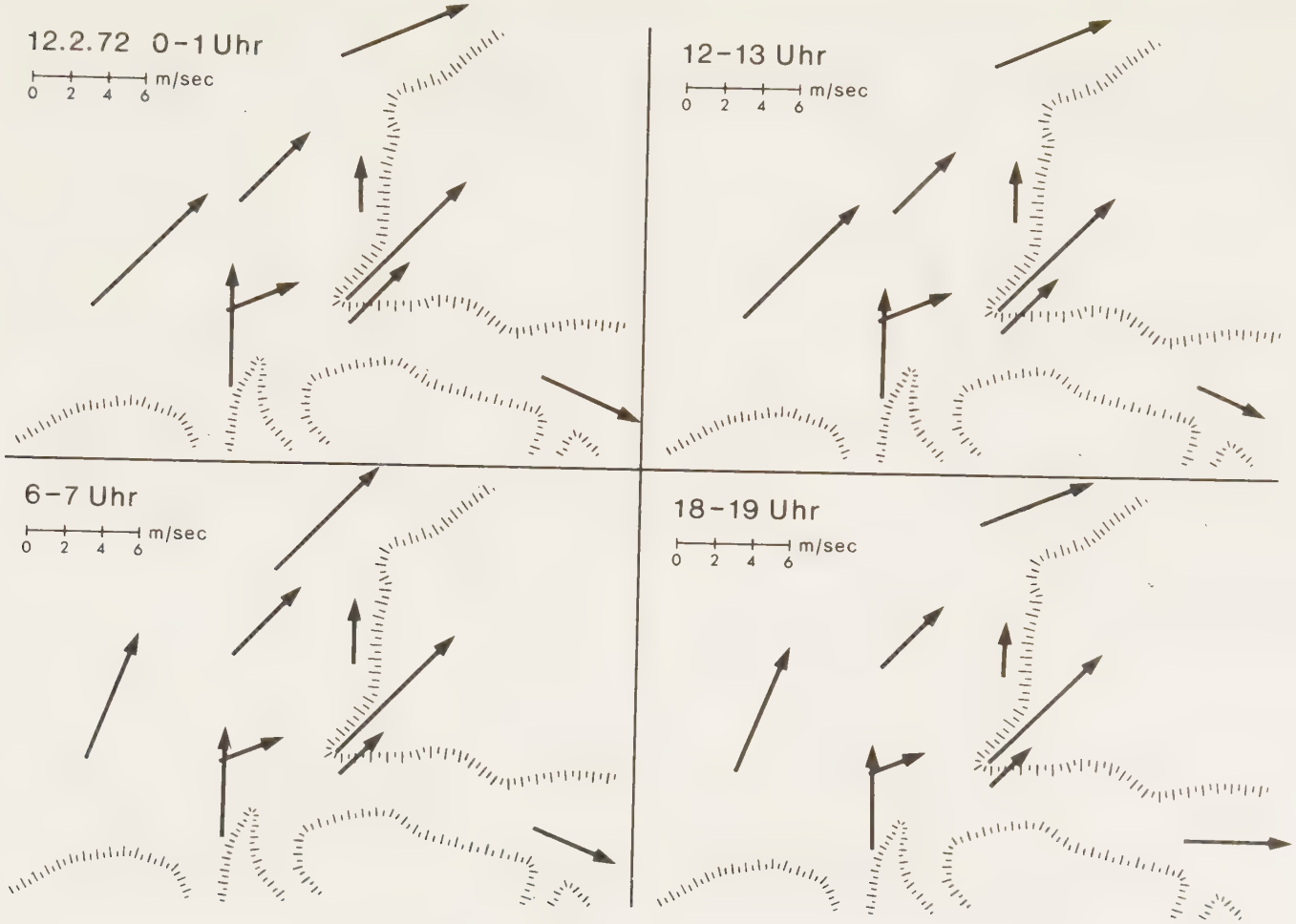

9.3.72 0-1 Uhr
0 2 4 6 m/sec
1-2 Uhr
0 2 4 6 m/sec
2-3 Uhr
0 2 4 6 m/sec
3-4 Uhr
0 2 4 6 m/sec

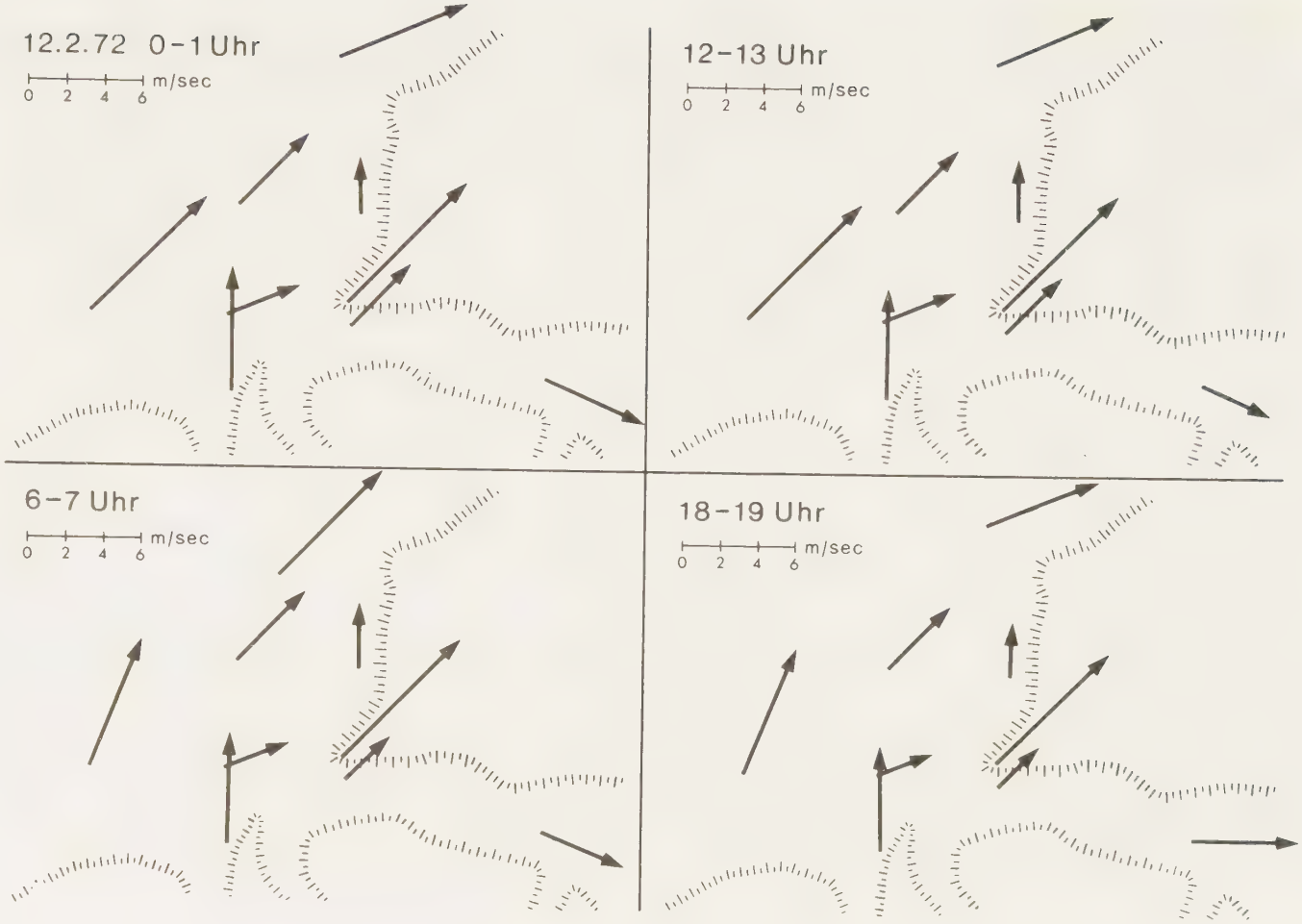
9.3.72 4-5 Uhr
0 2 4 6 m/sec
5-6 Uhr
0 2 4 6 m/sec
6-7 Uhr
0 2 4 6 m/sec
7-8 Uhr
0 2 4 6 m/sec


9.3.72 8-9 Uhr
m/sec
0 2 4 6
9-10 Uhr
m/sec
0 2 4 6
10-11 Uhr
m/sec
0 2 4 6
11-12 Uhr
m/sec
0 2 4 6


9.3.72 12-13 Uhr
0 2 4 6 m/sec
13-14 Uhr
0 2 4 6 m/sec
14-15 Uhr
0 2 4 6 m/sec
15-16 Uhr
0 2 4 6 m/sec


9.3.72 16-17 Uhr
0 2 4 6 m/sec
17-18 Uhr
0 2 4 6 m/sec
18-19 Uhr
0 2 4 6 m/sec
19-20 Uhr
0 2 4 6 m/sec


12.2.72 0-1 Uhr
0 2 4 6 m/sec
12-13 Uhr
0 2 4 6 m/sec
6-7 Uhr
0 2 4 6 m/sec
18-19 Uhr
0 2 4 6 m/sec


12.2.72 0-1 Uhr
0 2 4 6 m/sec
12-13 Uhr
0 2 4 6 m/sec
6-7 Uhr
0 2 4 6 m/sec
18-19 Uhr
0 2 4 6 m/sec

3.3. Eintrittszeit, Stärke und Richtungskonstanz von Berg– und Talwind (Beispiel einer 6–tägigen Höllentälersituation)

Die Darstellung in Stundenintervallen gestattet recht detaillierte Aussagen über die Entwicklung des Windfeldes. Einige charakteristische Eigenheiten können aber nur erkannt werden, wenn nan sich auch von den Stundenmittelwerten löst. Sie werden am Beispiel einer 6–Tage–Periode, in der das Lokalwindsystem beispielhaft entwickelt war, kurz erläutert. Dabei wird auf die Originalaufzeichnungen zurückgegriffen, weil eine generalisierende Umzeichnung für diesen Zweck zu hohen Informationsverlust bedeuten würde. Abb. 16 zeigt die Registrierung von Windrichung und –geschwindigkeit vom 20. – 25.3.73 an den Stationen Ganter (8) und Haid (1).

Das Woelfle–Gerät (vgl. DWD 1973) zeichnet durch Ritzwalzen auf der linken Seite eines Wachspapierstreifens die Schwankung der Windfahne um die vorherrschende Windrichtung, auf der rechten Seite den Windweg auf. Geringe Steigung, d. h. großer Windweg / Zeiteinheit zeigt hohe, große Steigung geringe Windgeschwindigkeit an. Wird die Diagrammbreite (= 10 km Windweg) in einer Stunde (zwischen zwei Querstrichen) überfahren, entspricht das einem Stundenmittel von 2.8 m/sec, zwei Durchläufe/Std entsprechen 5.6 m/sec. etc.

	GANTER	HAID
20.3.	Richtungskonstanter ESE/E Wind bis 8.50 Uhr, abrupter Umschlag auf NNW nach vorangehender geringfügiger Verlangsamung (2.8 st. 4.0 m/sec). Im Laufe des Tages langsames Drehen auf W, aber dauernd starke Richtungsschwankungen. Zwischen 17.30 u. 19.20 zunehmende Verlangsamung auf 1.7 m/sec. Dann Umschlag auf ESE innerhalb weniger Minuten, mit schnell zunehmender Geschwindigkeit (4.6 m/sec).	E–Wind vergleichbarer Stärke (4.0 m/sec) danach bei gleicher Richtung Abflauen bis 5.30 Uhr. Dann bis 8 Uhr Windstille bzw. leichtes Pendeln um SW. Eine Stunde früher (7.50 Uhr) Einsetzen des NNW–Windes, der – von 2 Stdt. SW unterbrochen – bis 19 Uhr langsam auf NNE dreht. Zwischen 19.30 und 20.20 allmählicher Übergang zu E–Wind, der aber bis 24 Uhr sehr schwach bleibt (zuletzt 1.8 und 1.4 m/sec).
21.3.	Gleiches Muster wie am Vortag; Umschlagszeiten morgens wieder 8.50 Uhr abends bereits früher (18.30Uhr).	Bis zum Einsetzen des N–Windes um 7.30 Windgeschwindigkeit meist < 1.0 m/sec; Bergwind hat sich nicht bis nach W durchgesetzt. Abends wie am Vortag (Übergang auf schwachen E bis 19.10).
22.3.	Gleiches Muster wie am Vortag; Umschlagszeit morgens 8.30, abends erneut früher (17.30 Uhr), d. h. Bergwindeinfluß verlängert und intensiviert (max. 6.2 m/sec zwischen 21 und 22 Uhr).	0 bis 8 Uhr fast windstill, danach bis 13 Uhr SW–Wind und erst dann die bisher tagsüber maßgebende N–Komponente (1.1–1.8 m/sec, stark richtungsschwankend). ((Der Talwind an der Station Ganter wird also aus 2 Quellen gespeist, SW und N)). Ab 18.20 richtungskonstanter ESE–Wind (bis 4.7 m/sec; d. h. Bergwind nur wenig verlangsamt bis nach W durchgedrungen.
23.3.	Der am Vortag früh einsetzende Bergwind hält auch lange an: Nach 15 1/2 Stunden E–Wind Umschlag um 9.Uhr. Sonst gleiches Muster, Umschlag abends 17.40 mit schnell auf 6.6. m/sec zuneh-	E hält bis 3 Uhr an, danach wie Vortag (Richtungsänderung) 8.40 und 18.20 Uhr).

24.3.	Wie am Vortag, Umschlagszeiten erneut zusammengerückt (9.30 / 17.00 Uhr).	E—Wind nur bis 1 Uhr, danach Abflauen bis 9.30 Uhr. Dann ganztags mäßiger SW—Wind. Bei nachts gleichem Muster wie an den Vortagen tagsüber andere Windrichtung: Bergwind setzt sich auch gegen SW—Strömung durch.
25.3.	Intensiver Bergwind (ESE, max. 8.0 m/sec) bis 9 Uhr, danach unmittelbar Übergang zu etwas schwächerem (max. 5.0 m/sec) SW. Trotz anhaltender SW—Strömung um 21 Uhr — 3 Stunden später als an den Vortagen — Übergang zu E—Wind.	Bergwind bis zum Morgen anhaltend (max. 5.0 m/sec). Nach 8 Uhr innerhalb 45 min gleichmäßiger Übergang zu kräftigem SW—Wind (8.3 m/sec) der im Laufe des Tages auf W dreht.

Zusammenfassend ist festzuhalten:

- Folgen mehrere Tage aufeinander, die die Ausbildung des Lokalwindsystems zulassen, intensiviert sich der Einfluß des Bergwindes. Die Intensivierung äußert sich in zunehmender Andauer (bis 15 1/2 Stunden/Tag) und höheren Maximalgeschwindigkeiten (bis 8 m/sec).
- Der Bergwind setzt sich auch gegen eine relativ starke SW—Strömung durch (25.3.), die tagsüber den sonst vorhandenen Talwind aus NNW verdrängen kann.
- Der Bergwind weist — auch an der orographisch nicht beeinflußten Station Haid— eine hohe Richtungskonstanz auf; Der Talwind ist dagegen weniger richtungsbeständig.
- Im Dreisamtal erfolgt der Richtungwechsel um 180° abrupt innerhalb weniger Minuten. Abends setzt der Bergwind sofort mit großer Geschwindigkeit ein, der Talwind wird ab rund zwei Stunden vor dem Umschlag zunehmend langsamer. Morgens ist der Wechsel noch krasser, weil der Bergwind bis zuletzt unvermindert weht und der Talwind von Beginn an annähernd seine — im Vergleich zum Bergwind geringe — Maximalgeschwindigkeit hat.
- Im Westen der Stadt sind die Verhältnisse je nach Intensität des Bergwindes differenzierter. Zwischen den Richtungswechseln liegen hier v. a. morgens längere Übergangsphasen mit geringer Windgeschwindigkeit. Bei schwachem Bergwind im Osten der Stadt ist im Westen nur ein leichtes Pendeln um ESE zu beobachten, bei starkem dagegen setzt auch hier abrupt ein richtungskonstanter ESE—Wind ein, der aber meist noch während der Nacht wieder abflaut. Wenn sich der Bergwind bis nach W durchsetzt, gilt das meist nur für die erste Hälfte der Nacht.
- Die Verspätung des Einsetzens des Bergwindes an der Station Haid gegenüber der Station Ganter beträgt 30 — 80 min, d. h. die Grenze zwischen Berg— und Talwind verlagert sich auf der 4.5 kam langen Strecke durch die Stadt mit einer Geschwindigkeit zwischen 0.95 und 2.62 m/sec talwärts. Der Bergwind verliert dabei durch Reibung und Strömungsdivergenz an Intensität, die Strömungsgeschwindigkeit geht von 8.0 bis 4.6 auf 5.7 bis 3.2 m/sec (jeweils Höchstwerte) zurück.

Die beiden letztgenannten Punkte sind gut mit den Ergebnissen der WI—Untersuchung vereinbar, wo besonders auf die Sonderrolle der Stadtteile im Dreisamtal und die Verlagerung der WI nach W im Südteil der Stadt abgehoben wurde.

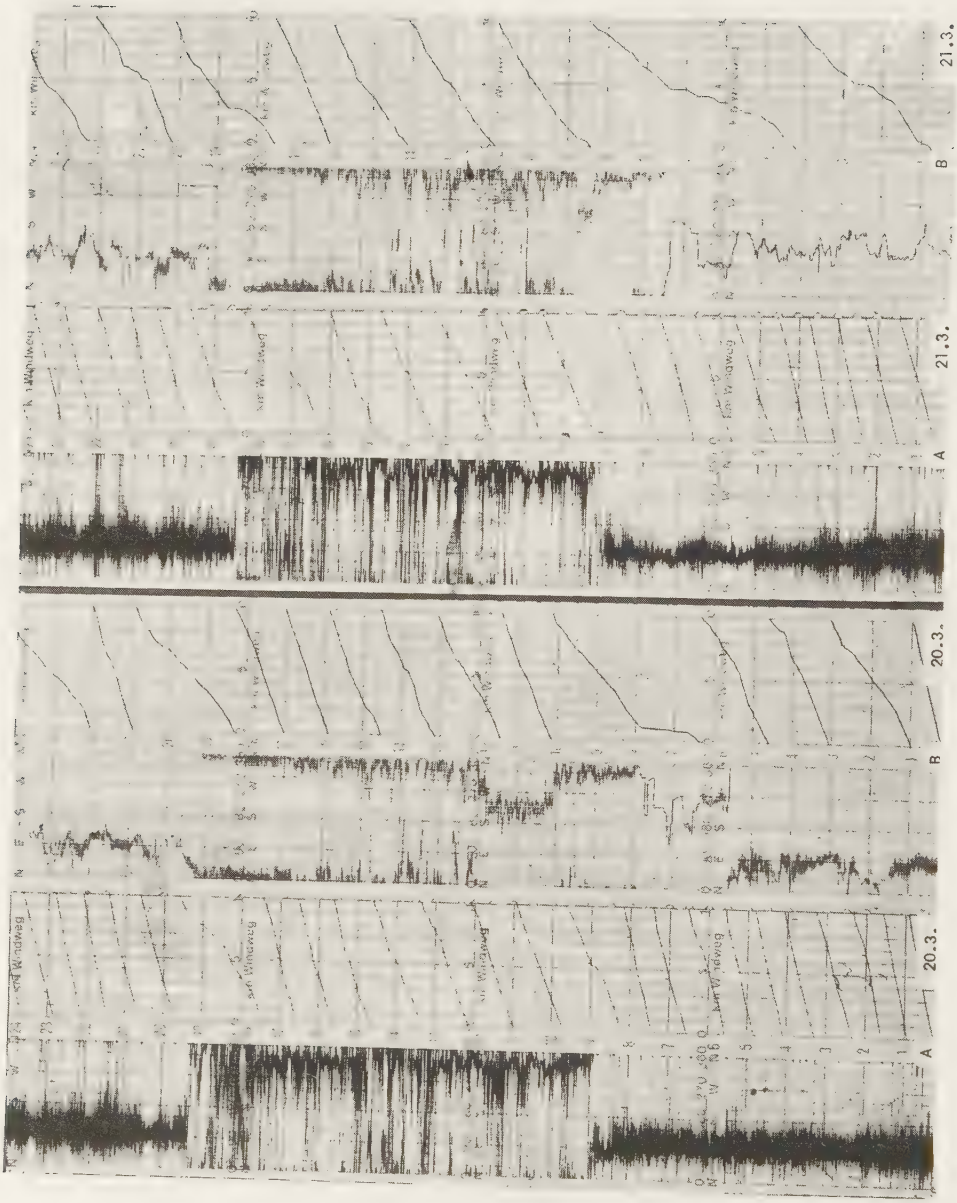
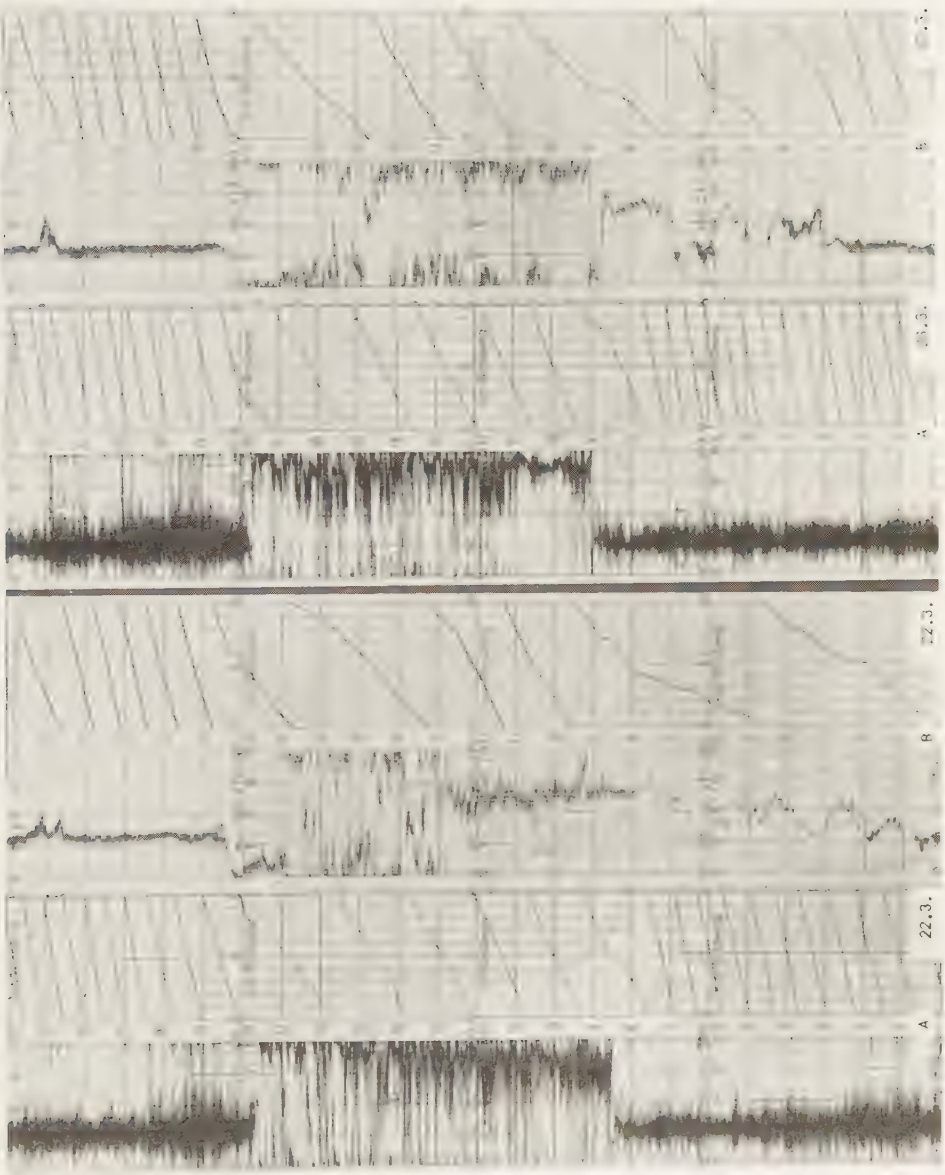
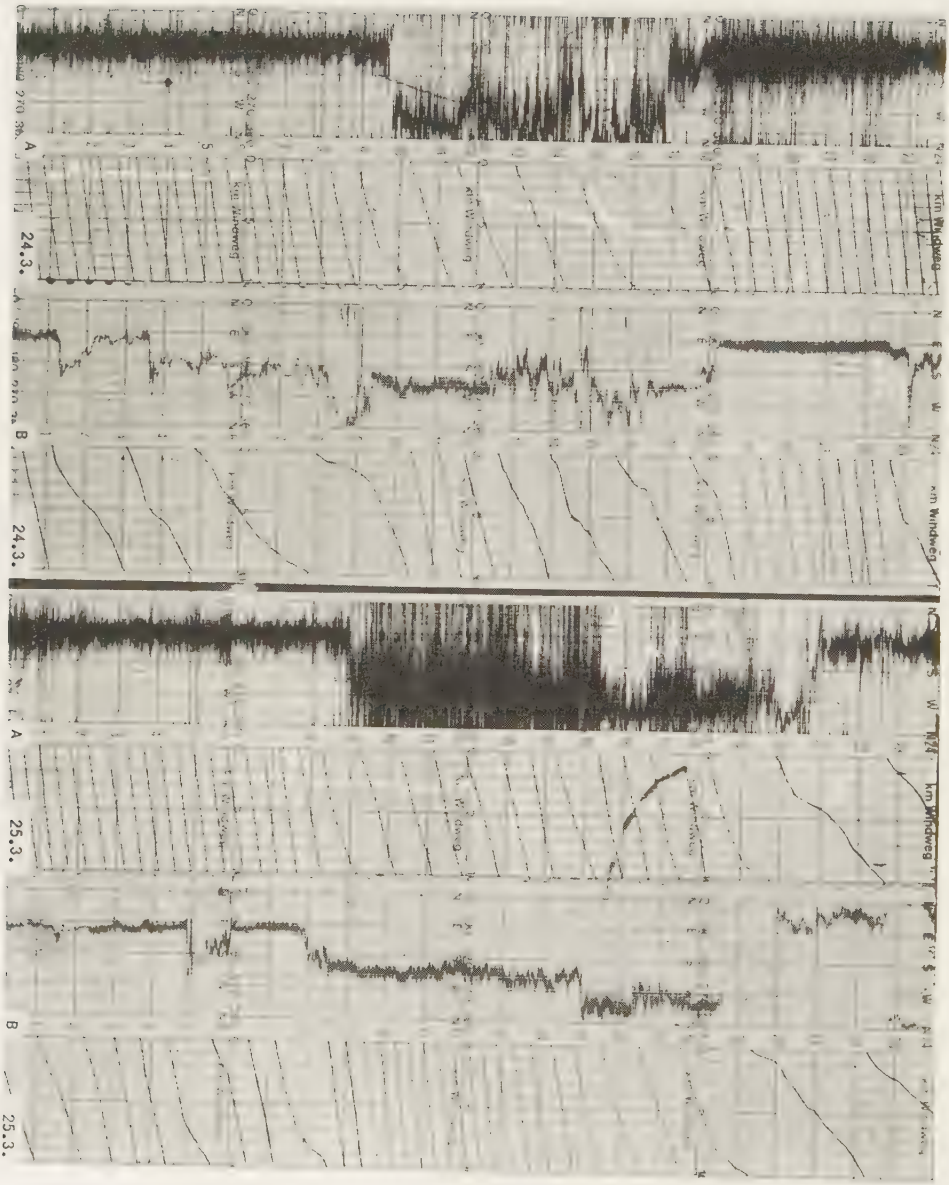


Abb. 16: Aufzeichnungen von Windirchtung und -weg an den Stationen Ganter (8) und Haid (1) vom 20. – 25.3.73


22.3.
A
22.3.
B
21.3.
A
21.3.
B


A
24.3.
B
24.3.
A
25.3.
B
25.3.

3.4. Temperaturerhöhung durch Höllentäler?

Die Strömungsverhältnisse sind mit den Beobachtungen des Temperaturfeldes vereinbar. Dies gilt jedoch nur eingeschränkt, wenn man die in Abschn. 2 in ihrer historischen Entwicklung dargelegte Auffassung einer temperaturerhöhenden Wirkung des Bergwindes zugrunde legt. Es wurde darauf hingewiesen, daß diese Auffassung nur durch kurzfristige Temperatursprünge auf Thermographenregistrierungen belegt ist, wobei sich die Frage ergab, weshalb entsprechende Temperaturerhöhungen nicht unmittelbar mit dem Einsetzen des Bergwindes gekoppelt sind.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung bot sich erstmals Gelegenheit, Wind– und Temperaturregistrierungen in den in Frage kommenden Stadtteilen gleichzeitig durchzuführen. In Abb. 17 wird der Gang von Lufttemperatur und Feuchte an den Stationen C und D für denselben Zeitraum wiedergegeben, für den oben (3.3) gezeigt wurde, daß das Berg–/Talwind–System beispielhaft entwickelt ist. Die Stationen C und D liegen in unmittelbarer Nachbarschaft der Windmeßstation Ganter (8) bzw. 0.5 km weiter talauf im Dreisamtal.

Es kommt klar zum Ausdruck, daß zwischen 20.3 und 24.3 autochthones Strahlungswetter mit während der Woche größer werdenden Temperaturamplituden und ansteigenden Maxima und Minima geherrscht hat. Die hier in Frage stehende abendliche Abkühlung vollzieht sich am 20. und 21.3. (– die oben als Tage mit noch relativ schwach ausgebildetem Höllentäler beschrieben wurden –), verglichen mit den folgenden Tagen langsam und gleichmäßig. Am 22., 23. und 24.3. (–Tage mit intensivem Bergwind –) setzt dagegen rund 2 Stunden nach Erreichen des Maximums ein scharfer Temperaturrückgang ein, an Station D sind es jeweils 8° in 2 Stunden. Dieser scharfe Knick in der Temperaturkurve, der an der Hangstation D noch etwas deutlicher als an Station C in Erscheinung tritt, erfolgt kurz nach dem Einsetzen des Höllentälers, der zu folgenden Zeiten beobachtet wurde:

20.3.	21.3.	22.3.	23.3.	24.3.	25.3.
19.20	18.30	17.30	17.40	17.00	21.00

Bei starkem Höllentäler vollzieht sich der abendliche Temperaturrückgang besonders rasch. Auch der Gesamtverlauf der Temperaturaufzeichnung spricht gegen die o. g. Auffassung: Die Temperaturänderungen während des ganzen Tages erfolgen kontinuierlich; 'Zacken' in der Registrierung, wie sie von v. RUDLOFF (1951) zur Begründung der immer wieder betonten Auffassung (zuletzt v. RUDLOFF 1971) des Höllentälers herangezogen wurden, sind an keinem der Tage festzustellen. Aus allen Beobachtungen – einschließlich der der WI – geht hervor, daß von einer temperaturerhöhenden Wirkung des Höllentälers nicht gesprochen werden kann.

Auch die im Rahmen der genannten Untersuchungen durchgeführten Pilotballonaufstiege unterstützen diese revidierte Auffassung.

Leider sind bisher nur zwei Einzelbeispiele daraus publiziert worden (NEUWIRTH 1972, S. 493; HARLFINGER 1974, Abb. II/3). Ich danke deshalb Herrn Reg.Dir. JURKSCH vom Deutschen Wetterdienst für die Erlaubnis, sein Manuskript zu verwenden.

Es geht daraus eindeutig hervor, daß der durch ausstrahlungsbedingte Kaltluft verursachte Bergwind auch in Höhe Freiburgs noch kalt gegenüber seiner Umgebung ist: Er setzt zunächst am Boden ein und setzt sich mit zunehmender Andauer nach oben durch, d. h. er schiebt sich unter den in größerer Höhe noch wirksamen Talwind bzw. eine gradientgesteuerte Oberströmung. In der Regel erreicht er eine Mächtigkeit von 300 – 400 m.

Als abschließender Beleg für die Richtigkeit der revidierten Auffassung, wonach der Höllentäler in Stadtteilen im Dreisamtal abkühlend wirkt und so zu einer thermischen N–S–Differenzierung des Stadtgebiets führt, kann schließlich die radiometrische Erfassung der Oberflächentemperaturen vom Flugzeug aus angeführt werden.

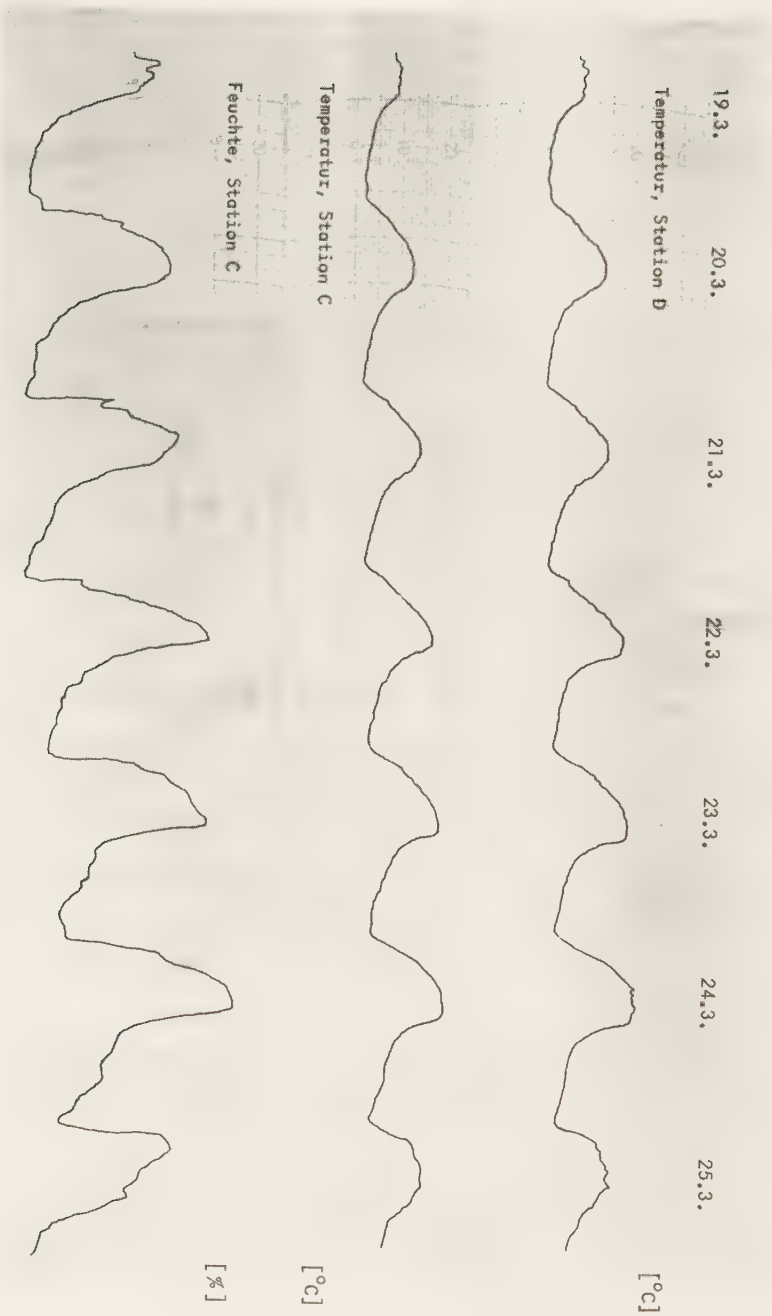


Abb. 17: Temperatur– und Feuchtegang an den Stationen C (Gärtnerei) und D (Mez, nur Temperatur) vom 19.3.73, 12 Uhr – 25.3.73, 24 Uhr

Die Variationen der Oberflächentemperatur sind zwar gerade in Städten besonders groß (KESSLER 1971, LANDSBERG u. MAISEL 1972, WEISCHET 1974, 1975). Trotzdem muß erwartet werden, daß sich aus dem Mosaik verschieden temperierter Körper für begrenzte, einheitlich strukturierte Bereiche charakteristische Flächenmittel der Oberflächentemperatur ergeben. Da die bodennahe Luftschicht mit ihrer Unterlage in Wärmeaustausch steht (Heiz– bzw. Kühlfläche), kann aus großflächig deutlich unterschiedlichen Oberflächentemperaturen in Stadtgebieten mit einheitlicher Struktur auf Differenzierungen in der Temperatur der auflagernden Luftschicht geschlossen werden. Unter der Voraussetzung, daß die Oberflächentemperaturen genau bestimmt und die Ausscheidung verschieden temperierter Gebiete nach objektivern Kriterien vorgenommen werden, kann damit die Fernerkundungstechnik einen Beitrag zu Fragen der Stadtklimatologie liefern.

Das folgende Beispiel einer flechenbedeckenden infrarotdiometrischen Aufnahmen der Oberflächentemperatur des Stadtgebiets von Freiburg ist dem Material entnommen, das 1976 im Rahmen des 'Deutschen Flugzeugmeßprogramms' (FMP) hergestellt wurde, dessen ausführliche Behandlung aber über den Rahmen der vorliegenden Untersuchung hinausgeht. (Vgl. GOSSMANN und NÜBLER, 1977, NÜBLER 1978, 1979). Es werden deshalb nur kurze Erläuterungen gegeben: Mit einem Multispektralscanner M^2S wurde – außer der in zehn Kanälen schmalbandig aufgeteilten Reflexstralung im kurzwelligen Teil des Spektrums (nur tags)– auch die Emission der Erdoberfläche im Wellenlängenbereich 8 – 14 μm auf Magnetband aufgezeichnet. Durch dauernden Vergleich mit zwei Eichstrahlern, deren Temperatur zur optimalen Ausnutzung des Dynamikbereichs frei wählbar ist, können die Meßsignale absolut in ^{o}C kalibriert werden. Die Daten wurden mit dem 'Digitalen Bildauswertungssystem (DIBIAS) der Deutschen Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft–und Raumfahrt in Oberpfaffenhofen ausgewertet. Dieses System gestattet auch dem Datenverarbeitungs–Ungeübten umfangreiche Manipulationen der Ausgangsinformation. Im vorliegenden Fall wurde die Möglichkeit der Bildentzerrung, der Mittelung über je 7 x 7 Bildelemente und der Herstellung von Äquidensiten benutzt. In diesen Möglichkeiten unterscheidet sich das FMP von den bisher in Stadtgebieten durchgeführten Befliegungsprogrammen in Frankfurt (LORENZ 1972), Freiburg (WEISCHET 1975), Heidelberg (FEZER 1975) und im Ruhrgebiet (HIRT 1975). Allgemein über die Technik der Infrarothermometrie einschleißlich der Scanner–Verfahren unterrichten zahlreiche Arbeiten von LORENZ (1967, 1971, 1973 a, b (Übersichtsartikel).

Abb. 18 zeigt die Verteilung der Oberflächentemperaturen am frühen Morgen (4.39 Uhr) des 1.4.76. Die Flughöhe über Grund betrug 3900 m; bei einer geometrischen Auflösung von 2.5 mrad ist damit ein thermisch unterscheidbares Bildelement je nach seiner Lage im Flugstreifen zwischen ca. 9 x 9 und 14 x 14 m^2 groß. Entsprechend der Einstellung der Eichstrahler werden Oberflächentemperaturen $\geqslant 20^{o}$ C weiß. solche $\leqslant -10^{o}$ C schwarz abgebildet. Dazwischen werden auf Magnetband 254 Grauwerte unterschieden, die wegen der geringeren Dynamik des photographischen Materials (Film und Papier) hier nur zusammengefaßt wiedergegeben werden. Unterschiede im Emissionsvermögen (vgl. Tab. 5, S. 25) werden naturgemäß nicht berücksichtigt; die dadurch bedingte Ungenauigkeit fällt für den folgenden großflächigen Vergleich nicht ins Gewicht.

Am Ende der Nacht, bei noch negativer Strahlungsbilanz (vor Sonnenaufgang), ist folgendes Muster der Oberflächentemperaturverteilung festzustellen:

Wärmste Oberflächen sind die die die Stadt umgebenden Wälder (von der Wasserfläche des Baggersees abgesehen), kälteste offene Wiesenflächen wie der Flugplatz, die Dreisamwiesen und Sportanlagen im E der Stadt (rechts oben) und das Gelände zwischen Günterstal und Unterwiehre. Für die hier anstehende Frage ist v. a. die Differenzierung innerhalb des Kernbereichs der Stadt interessant. Die Innenstadt weist die höchsten Oberflächentemperaturen auf, wobei der Schwerpunkt eindeutig in ihrem nördlichen Teil liegt. Im südlichen Teil ist ein deutlicher Helligkeitsabfall zum unteren Bildrand hin zu verzeichnen. Die Linie Haupt-

bahnhof – Schloßbergspitze (Schwabentor) trennt einen südlich im Dreisamtal gelegenen Bereich geringerer Oberflächentemperaturen von einem nördlich anschließenden mit höheren; ein im Vergleich zur nördlichen Innenstadt dunkelgraues Band läßt sich quer durch die südliche Innenstadt von E nach W verfolgen. Angesichts nur geringer Unterschiede in der Art der Bebauung ist dies als oberflächenkühlende Wirkung des auch an diesem Tage entwikkelten Bergwindes erklärbar. Sein Einfluß ist auch daran zu erkennen, daß der im linken unteren Bildviertel gelegene Teil der Stadt (Haslach, Weingarten) nirgends extrem niedrige Oberflächentemperaturen aufweist. Obwohl auch hier offene Wiesenflächen vorhanden sind (z. B. Bischofslinde und Dreisam oder an der Eschholzstraße zwischen Dreisam und Basler Landstraße) bilden sich hier keine etwa dem Flugplatz vergleichbaren Verhältnisse aus. Dies kann so gedeutet werden, daß durch die hier höheren Windgeschwindigkeiten ausstrahlungsbedingte Kaltluft nicht akkumulieren kann, u. U. sogar durch nach W verlagerte, von der Innenstadt her erwärmte Luft ersetzt wird. – Unbezweifelbar ist jedenfalls, daß die Grobanordnung von Gebieten relativ hoher bzw. niedriger Oberflächentemperatur recht gut mit der als WI–Typ 4/5 bezeichneten charakteristischen Verteilung der Lufttemperatur übereinstimmt.

Abb. 18: Verteilung der Oberflächentemperaturen im Stadtgebiet von Freiburg. Am 1. 4. 1976, 4.39 Uhr. (Scanner-Abtastung der Emission im Infrarot, 8 - 14 μm; Erläuterung im Text) Orientierung: Die Querachse des Bildes verläuft Nordwest - Sudost.

Zusammenfassung

Die vorliegende Untersuchung zum Stadtklima von Freiburg verfolgt zwei Ziele: Zum einen sollten die für Freiburg charakteristischen Merkmale der räumlichen Verteilung der Lufttemperatur beschrieben und erklärt werden, zum anderen sollte anhand umfangreicherer Beobachtungen ein Beitrag zur allgemeinen Diskussion der Enstehungsbedingungen, Strukturmerkmale und Einflußfaktoren der als städtische 'Wärmeinsel' bekannten positiven Temperaturanomalie der Städte geleistet werden.

Ausgehend von der Behandlung der Stadt—Freiland—Unterschiede der einzelnen Strahlungs— und Wärmehaushaltsgrößen werden anhand eines qualitativen Modells des städtisch modifizierten Wärmehaushalts die verschiedenen möglichen Ursachen für die Entstehung der Wärmeinsel herausgestellt. Besonders betont werden dabei die zahlreichen Interaktions— und Rückkoppelungsmechanismen, die die Bennenung einer einzigen bzw. einer dominierenden Ursache ausschließen.

Die Untersuchung der Wärmeinsel der Stadt Freiburg basiert auf 108 Temperaturmeßfahrten. Die verwendete Untersuchungsmethodik wird ausführlich diskutiert und mit der ähnlicher Meßprogramme verglichen. Die Ergebnisse der Meßfahrten werden in Isothermenkarten (mit auf die Temperatur eines Referenzpunktes bezogenen Isanomalen) dargestellt.

Die Übereinanderlagerung wechselnder Kombinationen von Isanomalenkarten gibt Einblick in die regelmäßig anzutreffenden Merkmale der Temperaturverteilung. Die Einzelkarten für einen bestimmten Meßfahrtentermin werden aufgrund der Isanomalenkonfiguration zu Typen geordnet und auf ihre Beziehung zu verschiedener meteorologischen Parametern untersucht.

Zur Kennzeichnung der mehr oder weniger starken Ausprägung der städtischen Temperaturanomalie wird der Begriff 'Wärmeinselintensität', d. h. die Differenzierung zwischen maximaler Stadt— und minimaler Freilandtemperatur verwendet. Sie erreicht einen maximalen Wert von 10.0^{o} C und variiert in wesentlich stärkerem Umfang als bisher angenommen. Dies gilt auch für Tage mit scheinbar gleichen meteorologischen Bedinungen und unabhängig von der Jahreszeit. Es kann gezeigt werden, daß — im Gegensatz zu teilweise vertretener Auffassung — keine eindeutige Beziehung zwischen Grad der Himmelsbedeckung und Intensität der Wärmeinsel besteht. Eine deutliche Abhängigkeit ist dagegen zwischen einigen Typen der inneren Struktur der Wärmeinsel und der jeweiligen Windrichtung nachweisbar: Die häufig zu beobachtende Nord— bzw. Nordwestverlagerung des Zentrums der Wärmeinsel, die Teilung des Innenstadtbereichs in wärmeren Nord— und kälteren Südteil, der stadtauswärts verschobene Rand der Wärmeinsel im Südwesten der Stadt und auch die Persistenz besonders tiefer Temperaturen im Nordwesten stehen mit der Wirksamkeit des lokalen Bergwindes (Höllentäler) in Zusammenhang.

Entsprechend ihrer Bedeutung für die Temperaturverteilung im Stadtgebiet werden die Windverhältnisse ausführlich erörtert. Die tagesperiodische Änderung des Windfeldes bei Höllentäler—Situationen kann erstmals für das ganze Stadtgebiet demonstriert werden. Die Auffassung über die thermische Wirksamkeit des Bergwindes wird anhand von synchronen Wind— und Temperaturmessungen und mit Hilfe von infrarotradiometrischen Aufnahmen der Oberflächentemperaturen revidiert.

ANMERKUNGEN

1 In der regelmäßig veröffentlichten Statistiken werden meist nur Flächen innerhalb der administrativen Grenzen der Städte, nicht aber die tatsächlich bebauten Flächen angegeben. Zahlenangaben über das Flächenwachstum der Bebauung sind deshalb spärlich.

2 Natürlich ist die Unterscheidung städtischer und ländlicher Siedlungen mittels Einwohnerzahl—Schwellenwerten problematisch, zumal diese je nach kulturellem Hintergrund unterschiedlich hoch angesetzt werden müßten. Für globale Übersichten gibt es aber kein besseres Hilfsmittel.

3 Nach wie vor haben aber Geographen führenden Anteil an der Entwicklung der Stadtklimatologie. Es seien nur die Namen von CHANDLER, ERIKSEN, OKE, TERJUNG und TYSON genannt.

4 Einen weiteren Beleg liefert der Deutsche Wetterdienst, der seinen neuen Meßwagen für lokalklimatologische und aerologische Untersuchungen 1972 als „Umweltschutzmeßzug" in Dienst stellte.

5 Vgl. z.B. die Gründung einer speziellen wissenschaftlichen Zeitschrift „Boundary—Layer Meteorology" mit Beginn 1970.

6 Eine Illustration zu dieser Aussage gibt z. B. die mehrspaltige Begriffsliste im Register des Lehrbuchs von BLÜTHGEN [2] 1966, S. 693—695.

7 Die ganze Frage läßt sich als Maßstabsproblem auffassen und ist mit der Generalisierungsproblematik bei der kartographischen Darstellung vergleichbar. Auch dort ist die zunehmende Abstraktion beim Übergang zu kleineren Maßstäben für jedermann selbstverständlich, die klassifizierende Zuordnung einzelner Maßstäbe zu bestimmten Maßstabsgruppen und deren Benennung dagegen umstritten.

8 Die Richtung von Strahlungsströmen mit Pfeilen zu bezeichnen geht m. W. auf MUNN (1966) und die von ihm herausgegebene Zeitschrift Boundary—Layer Meteorology zurück. Neuerdings verwendet auch KESSLER (1973) diese Schreibweise.

9 In der Originalarbeit sind die Werte wegen anderer Definition der Wärmeströme positiv (vgl. auch MUNN 1966, S. 3). Ich folge hier der sonst üblichen Bezeichnungsweise, wonach jeder Wärmestrom, unabhängig davon, ob er ab— oder aufwärts gerichtet ist, negativ genannt wird, wenn er für die Oberfläche einen Wärmeverlust bedeutet.

10 Aus diesem Grund ist die nomenklatorische Trennung von A und B angebracht.

11 Der suggestive Insel—Vergleich wurde zuerst in der englischen Literatur verwendet (‚urban heat island' bei CHANDLER 1960 noch in Anführungszeichen, ab 1961 ohne) und hat sich dort völlig durchgesetzt. Die deutsche Literatur nahm diesen Begriff nur zögernd auf, er ist aber inzwischen auch hier eingeführt (vgl. ERIKSEN 1976).

12 Werte für die Periode 1881 — 1930 aus Klimakunde des Deutschen Reiches, Band II, Berlin 1939.

13 Zwar lassen sich auch mit zwischen den Stationen interpolierten Werten Isothermenkarten zeichnen. Wie stark sie aber zwangsläufig generalisiert sein müssen, zeigt ein Vergleich dreier Arbeiten über Berlin: HEUSELER (1965), der von einem Stationsnetz ausgeht, muß sich mit großzügig über alle Geländeunterschiede hinwegschwin-

genden Isothermen behelfen, SCHULZE (1969) und ZACHARIAS (1972), die nach detaillierten Meßfahrten kartieren, verzeichnen ein wesentlich kleinräumigeres Muster von relativen Warm— bzw. Kaltgebieten.

14 Auch in jüngerer Zeit wurden noch Meßfahrten mit Flüssigkeitsthermometern durchgeführt, so z. B. von KALB (1962) in Köln, LOUW u. MEYER (1965) in Pretoria und von HUTCHEON et al. (1967) in Corvallis, Oregon.

15 Als das anschließende neue Stadium wird in späterem Rückblick vermutlich die Einführung von Fernerkundungstechniken erscheinen.

16 Vgl. die Frankfurter Untersuchung (RPU 1972) mit schlechten Erfahrungen bei Aufstellung in freiem Gelände bzw. in Parks (SCHARRER, pers. Mitt.).

17 HOFFMANN, MALKOWSKI u. HEUSELER (1965) hielten bei ihrem Berliner Hubschraubermeßflug — m. E. ungerechtfertigterweise — den halb so großen Vorschub (0.5 cm/min) für ausreichend.

18 Eine geringfügige zusätzliche Erhöhung der Anpassungszeiten ergibt sich aus der Tatsache, daß der Meßfühler mit dem ihn umgebenden, die Wärmekapazität erhöhenden Strahlungsschutzhülsen ein Gesamtsystem bildet (Strahlungsaustausch zwischen Fühler und Hülse) (GOSSMANN pers. Mitt.). Dasselbe gilt für alle anderen in der Literatur beschriebenen Apparaturen.

19 Die ursprünglich vom Deutschen Wetterdienst geplante Übernahme dieser Station als Nebenstation des amtlichen Netzes, d. h. also mit regulären Terminablesungen, konnte aus personellen Gründen 1974 doch nicht realisiert werden.

20 Der Schwerpunkt des Interesses liegt auf diesen autochthon bestimmten Wetterlagen. Durch advektive Einflüsse können die geschilderten Verhältnisse natürlich auf vielfache Weise modifiziert werden, einen — normalen — Tagesgang der Temperatur gibt es dann nicht.

21 In der gesamten Literatur über Meßfahrten wird bestenfalls von der Verwendung reduzierter Werte gesprochen; das für die Reduzierung verwendete Verfahren wird aber in keinem Fall erläutert.

22 Die Zurückhaltung bei der Linienführung der Isanomalen wird hier besonders betont, weil oben auf die m. E. unzulässige Großzügigkeit der Darstellung bei PEPPLER (1929) hingewiesen wurde. Auch CHANDLERs (1961, S. 303) bekannte und häufig nachgedruckte (z. B. bei CHANDLER 1962, S. 295; 1965, S. 164; MUNN 1966, S. 200; PETERSON 1971, S. 134; FRISKEN 1973, S. 26) Isothermenkarte aus London täuscht tatsächlich nicht vorhandene Vollständigkeit vor: Nur für einen Teil der City und den Norden von London lagen Messungen vor, die Ausdehnung der Isolinien auf den NE sowie den gesamten S und W der Riesenstadt ist reine Spekulation.

23 Als Vorbergzone werden Schollen meist flachlagernder mesozoischer und tertiärer Sedimente bezeichnet, die entsprechend dem Staffelbruchcharakter des Oberrheingrabens bei der jungtertiären Hebung weniger stark angehoben wurden als die östlichen Gebirgsteile, aber doch soweit, daß sie heute als den Schwarzwaldrand begleitende Hügellandzone 80 — 300 m über die pleistozäne Aufschotterung des Grabentiefsten aufragen.

24 Eine kurze Abgrenzung und Erläuterung gibt CREUTZBURG in CREUTZBURG et al. 1954, S. 254/55.

25 Es wurden nur die für die Unterschiede der Baustruktur relevanten Hauptentwicklungsstadien genannt. Ausführliche historische Informationen gibt die Amtliche Kreisbeschreibung FREIBURG I. BREISGAU 1965 (Bd. I/2).

ANMERKUNGEN

1 In der regelmäßig veröffentlichten Statistiken werden meist nur Flächen innerhalb der administrativen Grenzen der Städte, nicht aber die tatsächlich bebauten Flächen angegeben. Zahlenangaben über das Flächenwachstum der Bebauung sind deshalb spärlich.

2 Natürlich ist die Unterscheidung städtischer und ländlicher Siedlungen mittels Einwohnerzahl—Schwellenwerten problematisch, zumal diese je nach kulturellem Hintergrund unterschiedlich hoch angesetzt werden müßten. Für globale Übersichten gibt es aber kein besseres Hilfsmittel.

3 Nach wie vor haben aber Geographen führenden Anteil an der Entwicklung der Stadtklimatologie. Es seien nur die Namen von CHANDLER, ERIKSEN, OKE, TERJUNG und TYSON genannt.

4 Einen weiteren Beleg liefert der Deutsche Wetterdienst, der seinen neuen Meßwagen für lokalklimatologische und aerologische Untersuchungen 1972 als „Umweltschutzmeßzug" in Dienst stellte.

5 Vgl. z.B. die Gründung einer speziellen wissenschaftlichen Zeitschrift „Boundary—Layer Meteorology" mit Beginn 1970.

6 Eine Illustration zu dieser Aussage gibt z. B. die mehrspaltige Begriffsliste im Register des Lehrbuchs von BLÜTHGEN [2] 1966, S. 693–695.

7 Die ganze Frage läßt sich als Maßstabsproblem auffassen und ist mit der Generalisierungsproblematik bei der kartographischen Darstellung vergleichbar. Auch dort ist die zunehmende Abstraktion beim Übergang zu kleineren Maßstäben für jedermann selbstverständlich, die klassifizierende Zuordnung einzelner Maßstäbe zu bestimmten Maßstabsgruppen und deren Benennung dagegen umstritten.

8 Die Richtung von Strahlungsströmen mit Pfeilen zu bezeichnen geht m. W. auf MUNN (1966) und die von ihm herausgegebene Zeitschrift Boundary—Layer Meteorology zurück. Neuerdings verwendet auch KESSLER (1973) diese Schreibweise.

9 In der Originalarbeit sind die Werte wegen anderer Definition der Wärmeströme positiv (vgl. auch MUNN 1966, S. 3). Ich folge hier der sonst üblichen Bezeichnungsweise, wonach jeder Wärmestrom, unabhängig davon, ob er ab— oder aufwärts gerichtet ist, negativ genannt wird, wenn er für die Oberfläche einen Wärmeverlust bedeutet.

10 Aus diesem Grund ist die nomenklatorische Trennung von A und B angebracht.

11 Der suggestive Insel—Vergleich wurde zuerst in der englischen Literatur verwendet (‚urban heat island' bei CHANDLER 1960 noch in Anführungszeichen, ab 1961 ohne) und hat sich dort völlig durchgesetzt. Die deutsche Literatur nahm diesen Begriff nur zögernd auf, er ist aber inzwischen auch hier eingeführt (vgl. ERIKSEN 1976).

12 Werte für die Periode 1881 — 1930 aus Klimakunde des Deutschen Reiches, Band II, Berlin 1939.

13 Zwar lassen sich auch mit zwischen den Stationen interpolierten Werten Isothermenkarten zeichnen. Wie stark sie aber zwangsläufig generalisiert sein müssen, zeigt ein Vergleich dreier Arbeiten über Berlin: HEUSELER (1965), der von einem Stationsnetz ausgeht, muß sich mit großzügig über alle Geländeunterschiede hinwegschwin-

genden Isothermen behelfen, SCHULZE (1969) und ZACHARIAS (1972), die nach detaillierten Meßfahrten kartieren, verzeichnen ein wesentlich kleinräumigeres Muster von relativen Warm— bzw. Kaltgebieten.

14 Auch in jüngerer Zeit wurden noch Meßfahrten mit Flüssigkeitsthermometern durchgeführt, so z. B. von KALB (1962) in Köln, LOUW u. MEYER (1965) in Pretoria und von HUTCHEON et al. (1967) in Corvallis, Oregon.

15 Als das anschließende neue Stadium wird in späterem Rückblick vermutlich die Einführung von Fernerkundungstechniken erscheinen.

16 Vgl. die Frankfurter Untersuchung (RPU 1972) mit schlechten Erfahrungen bei Aufstellung in freiem Gelände bzw. in Parks (SCHARRER, pers. Mitt.).

17 HOFFMANN, MALKOWSKI u. HEUSELER (1965) hielten bei ihrem Berliner Hubschraubermeßflug — m. E. ungerechtfertigterweise — den halb so großen Vorschub (0.5 cm/min) für ausreichend.

18 Eine geringfügige zusätzliche Erhöhung der Anpassungszeiten ergibt sich aus der Tatsache, daß der Meßfühler mit dem ihn umgebenden, die Wärmekapazität erhöhenden Strahlungsschutzhülsen ein Gesamtsystem bildet (Strahlungsaustausch zwischen Fühler und Hülse) (GOSSMANN pers. Mitt.). Dasselbe gilt für alle anderen in der Literatur beschriebenen Apparaturen.

19 Die ursprünglich vom Deutschen Wetterdienst geplante Übernahme dieser Station als Nebenstation des amtlichen Netzes, d. h. also mit regulären Terminablesungen, konnte aus personellen Gründen 1974 doch nicht realisiert werden.

20 Der Schwerpunkt des Interesses liegt auf diesen autochthon bestimmten Wetterlagen. Durch advektive Einflüsse können die geschilderten Verhältnisse natürlich auf vielfache Weise modifiziert werden, einen — normalen — Tagesgang der Temperatur gibt es dann nicht.

21 In der gesamten Literatur über Meßfahrten wird bestenfalls von der Verwendung reduzierter Werte gesprochen; das für die Reduzierung verwendete Verfahren wird aber in keinem Fall erläutert.

22 Die Zurückhaltung bei der Linienführung der Isanomalen wird hier besonders betont, weil oben auf die m. E. unzulässige Großzügigkeit der Darstellung bei PEPPLER (1929) hingewiesen wurde. Auch CHANDLERs (1961, S. 303) bekannte und häufig nachgedruckte (z. B. bei CHANDLER 1962, S. 295; 1965, S. 164; MUNN 1966, S. 200; PETERSON 1971, S. 134; FRISKEN 1973, S. 26) Isothermenkarte aus London täuscht tatsächlich nicht vorhandene Vollständigkeit vor: Nur für einen Teil der City und den Norden von London lagen Messungen vor, die Ausdehnung der Isolinien auf den NE sowie den gesamten S und W der Riesenstadt ist reine Spekulation.

23 Als Vorbergzone werden Schollen meist flachlagernder mesozoischer und tertiärer Sedimente bezeichnet, die entsprechend dem Staffelbruchcharakter des Oberrheingrabens bei der jungtertiären Hebung weniger stark angehoben wurden als die östlichen Gebirgsteile, aber doch soweit, daß sie heute als den Schwarzwaldrand begleitende Hügellandzone 80 — 300 m über die pleistozäne Aufschotterung des Grabentiefsten aufragen.

24 Eine kurze Abgrenzung und Erläuterung gibt CREUTZBURG in CREUTZBURG et al. 1954, S. 254/55.

25 Es wurden nur die für die Unterschiede der Baustruktur relevanten Hauptentwicklungsstadien genannt. Ausführliche historische Informationen gibt die Amtliche Kreisbeschreibung FREIBURG I. BREISGAU 1965 (Bd. I/2).

26 Bekanntlich weisen auch völlig disparate Größen u. U. eine hohe Korrelation auf. MARSAL (1967, S. 3) führt als drastisches Beispiel für eine solche Scheinkorrelation den formalen Zusammenhang zwischen Zunahme der Bevölkerung und der Landsenkung in Holland an.

27 In der Übereinanderlagerung aller Karten können zwei Faktoren zu großer Liniendichte beitragen: „Ortsfestigkeit" einer Linie bei mehreren Terminen oder geringer Abstand mehrerer Linien im Einzelfall. Am Bezugspunkt Betzenhausen, wo sich definitionsgemäß alle 0°—IA treffen, ist der erste Effekt ausschlaggebend, sonst lassen sie sich nicht trennen.

28 Zur Kennzeichnung großer horizontaler Temperaturgradienten an der Grenze Stadt/Freiland erweitern OKE u. FUGGLE (1972, S. 295) den bildhaften Vergleich des Isothermenbildes mit einer Isohypsendarstellung (Insel ⇒ Wärmeinsel, vgl. oben Anm. 11) und sprechen von einem „heat—island 'cliff' ". Im folgenden werden einige weitere Analogiebildungen zu Begriffen aus der Topographie verwendet.

29 Daraus ist zu schließen, daß die Temperatur am Bezugspunkt z. T. von der Stadt her beeinflußt wird. Eine am Stadtrand gelegene Station kann also nicht unbedingt als repräsentativ für das weiter entfernte Freiland angesehen werden.

30 Die beiden genannten Meßfahrten wurden hier aufgenommen, obwohl sie nicht dem in 4.2.1. geforderten Kriterium einer WI—Intensität von $> 3^{o}$ C genügen.

31 Der in Tab. 13, Spalte 7 angegebene Wert für die WI—Intensität ist definiert als $T_{max} - T_{min}$. Bei den Mittagsmeßfahrten kann, im Gegensatz zum Aben— und Morgentermin, T_{max} im Freiland, T_{min} im Stadtzentrum vorkommen.

32 Als Beispiel wird die Meßfahrt vom 1.5.73 verwendet, weil durch die feiertägliche Verkehrsruhe ein die übrigen Mittagsmeßfahrten beeinträchtigender Störfaktor weitgehend ausgeschaltet war.

33 Bei Meßfahrt Nr. 32 wurde die Station E nicht angefahren. Wegen des anderen Bezugspunktes ist sie mit den übrigen Meßfahrten nicht direkt (IA—Werte) vergleichbar. Sie wird deshalb bei den IA—Sammelkarten nicht berücksichtigt, wegen ihres Ausnahmecharakters hier aber trotzdem aufgeführt.

34 Auch NEUWIRTH (1972) nennt diese Quelle, zitiert allerdings nur aus dem Kapitel 'Klima und Witterung' S. 73 — 80. Die genannte Beschreibung von BAUMGÄRTNER befindet sich dagegen an ziemlich entlegener Stelle unter der Überschrift 'Gesundheitszustand Freiburgs' (S. 218 — 230). Bereits Anfang des 19. Jahrhunderts wurde der Bergwind also unter dem Aspekt der Lufthygiene gesehen.

35 Ich danke Herrn Dr. H. GOSSMANN für die freundliche Unterstützung und Herrn H. WIEBER für die Durchführung der Programmierarbeiten.

LITERATUR

AICHELE, H.: Über die Verwendung fahrbarer Temperaturschreiber bei geländeklimatischen Untersuchungen.Angewandte Meteorologie 5 (1968), S. 267 – 276.

ANGELL, J., PACK, D.H., DICKSON, C.R., HOECKER, W.H.: Urban influence on night-time airflow estimated from tetroon flights. J. Appl. Meteorology 10 (1971), S. 194 – 204.

ATWATER, M.A.: Thermal effects of urbanization and industrialization in the boundary layer: A numerical study. Boundary–Layer Meteorology 3 (1973), S. 229 – 245.

BACH, W.: Strahlungshaushal: und lufthygienische Verhältnisse in Groß–Cincinnati, USA. Verh. d. 37. dt. Geographentages, Kiel 1969. Wiesbaden: Steiner 1970, S. 273 – 282.

BACH, W.: Variation of solar attenuation with height over an urbanized area. J. Air Poll. Control Assoc. 21 (1971 a), S. 621 – 628.

BACH, W.: Atmospheric turbidity and air pollution in Greater Cincinnati. Geogr. Review 61 (1971b) S. 573 – 594.

BACH, W. + PATTERSON, W.: Heat Budget Studies in Greater Cincinnati. Proc.Assoc. Amer.Geographers 1 (1969), S. 7 – 11.

BAKER, D.G., ENZ, J.W., PAULUS, H.J.: Frequency, duration, commencement time and intensity of temperature inversions at St.Paul–Minneapolis. J.Appl.Meteor. 8 (1969), S. 747 – 753.

BALCHIN, W.G.V. + PYE, N.: A micro–climatological investigation of Bath and the surrounding district. Quart. J. Royal Met.Soc. 73 (1947), S. 297 – 323.

BARTELS, H. + SCHARRER, H.: Zirkulations– und Temperaturunterschiede während ausgewählter Wetterlagen zu bestimmten Tages– und Nachtzeiten anhand von Messungen des Temporärstationsnetzes des Deutschen Wetterdienstes. In: Regionale Planungsgem. Untermain (Hg.): Lufthygienisch–Meteorolog. Modelluntersuchung in der Region Untermain, 4. Arbeitsbericht, S. 31 – 44. Frankfurt 1972.

BAUMGÄRTNER, : Der Gesundheitszustand Freiburgs. In: SCHREIBER, H.: Freiburg im Breisgau. 3. Aufl., Freiburg: Herder 1840, S. 218 – 230.

BAUR, F.: Einführung in die Großwetterkunde. Wiesbaden: Dietrich'sche Verlagshdlg. 1947.

BAUR, F.: Musterbeispiele europäischer Großwetterlagen. Wiesbaden 1947.

BERENYI, D.: Mikroklimatologie. Stuttgart: G. Fischer 1967.

BERG, H.: Das Stadtklima. In: P. VOGLER + E. KÜHN (Hg.): Medizin und Städtebau. München–Berlin–Wien 1957, Bd. 2, S. 101 – 118.

BERG, H.: Nächtlicher Temperaturanstieg am Rande einer Großstadt. Wetter und Leben 11 (1959), S. 9 – 11.

BERG, H. + METZLER, K.: Ergebnis einer Temperaturmeßfahrt durch die Stadt Hannover. Z.f.angew.Meteor./Das Wetter 52 (1935), S. 1 – 11.

BERNATZKY, A.: Grünflächen und Stadtklima. Städtehygiene 21 (1970), S. 131 – 135.

BIDER, M.: Temperaturunterschiede zwischen Stadt– und Freilandstationen. Helv.Phys.Acta 13 (1940), S. 5 – 7.

BJELANOVIC, M.: Mesoklimatische Studien im Rhein– und Moselgebiet: Ein Beitrag zur Problematik der Landesklimaaufnahme. Diss. Bonn 1967.

BLÜTHGEN, J.: Allgemeine Klimageographie. 2. Aufl., Berlin: de Gruyter 1966.

BÖER, W.: Einige Vorschläge zur praktischen Durchführung einer geländeklimatischen Aufnahme unter besonderer Berücksichtigung städtebaulicher Gesichtspunkte. Angew.Meteor.1 (1952), S. 219 – 222.

BÖER, W.: Technische Meteorologie. Leipzig: Teubner 1964. (Kap. 4, S. 78 – 145: Stadt– und Gebäudeklimatologie)

BORNSTEIN, R.D.: Observations of the urban heat island effect in New York City. J.Appl.Meteor. 7 (1968), S. 575 – 582.

BOWEN, J.S.: The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. Phys.Rev. 27 (1926), S. 779 – 787.

BOWNE, N.E. + BALL, J.T.: Observational comparison of rural and urban boundary layer turbulence. J.Appl.Meteor. 9 (1970), S. 862–873.

BREZINA, E. + SCHMIDT, W.: Das künstliche Klima in der Umgebung des Menschen. Stuttgart: Enke 1937. (Kap. Stadtklima S. 142 – 207)

BROOKS, C.E.P.: Selective annotated bibliography on urban climates. Meteorological Abstracts and Bibliography 3 (1952), Nr. 7, S. 734 – 773.

BRYSON, R.A. + ROSS, J.E: The climate of the city. In: DETWYLER, T.R. + MARCUS, M.G. (Hg.): Urbanization and environment. Belmont: Duxbury Press 1972, S. 51 – 68.

BÜDEL, H. + WOLF, J.: Münchener stadtklimatische Studien. Z.f.angew.Meteor./ Das Wetter 49 (1933), S. 4 – 10.

BUDYKO, M.I.: Climate and life. New York: Academic Press 1974. (Engl. Ausgabe d. russ. Originals v. 1971, hg. v. D.H. MILLER)

BÜRGER, K.: Zur Klimatologie der Großwetterlagen: Ein witterungsklimatologischer Beitrag. Berichte d. DWD 6, Nr. 45. Offenbach 1958.

BUSSE, W.: Temperaturmeßfahrten. Jahresber.d.Bad.Landeswetterdienstes, S. 12 – 13. Freiburg 1950.

CHANDLER, T.J.: Wind as a factor of urban temperatures. – A survey in north–east London. Weather 15 (1960), S. 204 – 213.

CHANDLER, T.J.: The changing form of London's heat island. Geography 46 (1961 a), S. 295 – 307.

CHANDLER, T.J.: Surface breeze effects of Leicester's heat island. East Midland Geogr. 15 (1961 b), S. 32 – 38.

CHANDLER, T.J.: Temperature and humidity traverses across London. Weather 17 (1962 a), S. 235 – 242.

CHANDLER, T.J: London's urban climate. Geogr. Journal 128 (1962 b), S. 279 – 302.

CHANDLER, T.J.: Diurnal, seasonal and annual changes in the intensity of London's heat island. Meteor. Magazine 91 (1962 c), S. 146 – 153.

CHANDLER, T.J.: City growth and urban climates. Weather 19 (1964), S. 170 – 171.

CHANDLER, T.J.: The climate of London. London: Hutchinson 1965.

CHANDLER, T.J.: Absolute and relative humidities in towns. Bull.Amer.Meteor.Soc. 48 (1967), S. 394 – 399.

CHANDLER, T.J.: Urban climatology and its relevance to urban design. Genf: WMO 1976. (WMO Technical Note No. 149)

CLARKE, J.F.: Nocturnal urban boundary layer over Cincinnati, Ohio. Monthly Weather Rev. 97 (1969), S. 582 – 589.

CONRADS, L.A. + VAN DER HAGE, J.C.H: A new method of airtemperature measrement in urban climatological studies. Atmosperic Environment 5 (1971), S. 629 – 635.

CREUTZBURG, N., EGGERS, H., NOACK, W., PFANNENSTIEL, M.: Freiburg und der Breisgau: Ein Führer durch Landschaft und Kultur. Freiburg: H.F. Schulz 1954.

DEFANT, F.: Zur Theorie der Hangwinde, nebst Bemerkungen zur Theorie der Berg– und Talwinde. Arch.Meteor.Geophys.Bioklim., Serie A, 1 (1949), S. 421 – 450.

DEFANT, F.: Local winds. In: T.F. MALONE (Hg.): Compendium of meteorology. Boston: Amer.Metor.Soc. 1951, S. 655 – 672.

DELAGE, Y. + TAYLOR, P.A.: Numerical studies of heat island circulations. Boundary–Layer Meteor. 1 (1970), 201 – 226.

DE MARRAIS, G.A.: Vertical temperature differences observed over an urban area. Bull.Amer.Meteor.Soc. 8 (1961), S. 548 – 554.

DETWYLER, T. (Hg.): Man's impact on environment. New York: McGraw–Hill 1971. (Teil 3, S. 81 – 194: Man's impact on atmosphere and climate)

Deutscher Wetterdienst (P. BOHR, P. HESS, T. MEISSNER, C. PFLUGBEIL): Allgemeine Meteorlogie. 2. Aufl., Offenbach: Selbstverlag d. DWD 1971 (Leitfäden f.d. Ausbildung im DWD, Nr. 1)

Deutscher Wetterdienst (BACH): Die Klimaverhältnisse im Großraum Bonn. Essen 1972 (Amtl. Gutachten)

Deutscher Wetterdienst (Hg.): Instrumentenkunde. 2. Aufl., Offenbach: Selbstverlag d. DWD 1973 (Leitfäden f.d. Ausbildung im DWD, Nr. 6)

Deutscher Wetterdienst (Hg.): Die Großwetterlagen Europas. Offenbach 1971 – 1973 (24. – 26. Jahrgang)

DIEM, M.: Feuchtemessung mit Hilfe thermoelektrischer Psychrometer. Arch.Meteor. Geophys.Bioklim., Serie B, 5 (1954), S. 59 – 65.

DIRMHIRN, I. + SAUBERER, F.: Klima und Bioklima von Wien. In: F. STEINHAUSER, O. ECKEL, F. SAUBERER (Hg.): Klima und Bioklima von Wien, 3. Teil. Wien 1959 (Wetter und Leben, Sonderheft 7) S. 122 – 135.

DOMRÖS, M.: Luftverunreinigung und Stadtklima im rheinisch–westfälischen Industriegebiet und ihre Auswirkungen auf den Flechtenbewuchs der Bäume. Bonn: Dümmlers 1966 (Arbeiten zur Rhein. Landeskunde, H. 23)

DUCKWORTH, F.A. + SANDBERG, J.S.: The effect of cities upon horizontal and vertical temperature gradients. Bull. Amer.Meteor.Soc. 35 (1954), S. 198 – 207.

DWD siehe: Deutscher Wetterdienst

EAGLEMAN, J.R.: A comparison of urban climatic modifications in three cities. Atmosph. Environment 8 (1974), S. 1131 – 1142.

EAST, C.: Comparaison du rayonnement solaire en ville et en campagne. Cah.de Geogr.de Quebec 12 (1968), S. 81 – 89.

ECKEL, O.: Die Temperaturverteilung in Wien und Umgebung. In: F. STEINHAUSER, O. ECKEL, F. SAUBERER (Hg.): Klima und Bioklima von Wien. Wien 1957 (Wetter und Leben, Sonderheft 5) S. 108 – 134.

EMONDS, H.: Das Bonner Stadtklima. Bonn: Selbstverlag des Geogr. Inst. 1954 (Arb.z.Rhein.Landeskunde, H. 7)

ERIKSEN, W.: Beiträge zum Stadtklima von Kiel. Kiel: Selbstverlag d. Geogr. Inst. 1964 (Schriften d. Geogr. Inst. d. Univ. Kiel, Bd. 22, H. 1)

ERIKSEN, W.: Das Stadtklima, seine Stellung in der Klimatologie und Beiträge zu einer witterungsklimatologischen Betrachtungsweise. Erdkunde 18 (1964), S. 257 – 266.

ERIKSEN, W.: Die stadtklimatischen Konsequenzen städtebaulicher Entwicklung. Städtehygiene 22 (1971), S. 259 – 262.

ERIKSEN, W.: Probleme der Stadt– und Geländeklimatologie. Darmstadt: Wiss.Buchgesellschaft 1975.

ERIKSEN, W.: Die städtische Wärmeinsel. Geogr. Rundschau 28 (1976), S. 368 – 373.

FINDLAY, B.F. + HIRT, M.S.: An urban–induced meso–circulation. Atmosph. Environment 3 (1969), S. 537 – 542.

FLOHN; H.: Witterung und Klima in Mitteleuropa. 2. Aufl., Stuttgart: Hirzel 1954.

FLOHN, H.: Geographische Aspekte der anthropogenen Klimamodifikation. In: Festkolloquim zum 65. Geburtstag von A. Kolb. Hamburg 1973 (Hamburger Geogr. Studien) S. 13 – 30.

FRISKEN, W.R.: The atmospheric environment of cities. Baltimore: Johns Hopkins UP 1973. (S. 9 – 48: The atmospheric environment of cities)

Freiburg: Flächennutzungsplanentwurf 1970. Hg. vom Stadtplanungsamt. Freiburg 1970.

Freiburg im Breisgau Stadtkreis und Landkreis. Amtliche Kreisbeschreibung, hg. v. Stat. Landesamt Bad.–Württ. Stuttgart–Freiburg 1965.

FUGGLE, R.F.: Rural/urban variations in atmospheric counter radiation. S.Afr.Geogr.J. 54 (1972), S. 138 – 144.

FUGGLE, R.F. + OKE, T.R.: Infrared flux divergence and the urban heat island. In: WMO 1970, S. 70 – 78

GARNETT, A. + BACH, W.: An investigation of urban temperature variations by traverses in Sheffield (1962 – 63). Biometeorology 2 (1967), S. 601 – 607.

GARSTANG, M., TYSON, P.D., EMMITT, G.D.: The structure of heat islands. Reviews in Geophysics and Space Physics 13 (1975), S. 139 – 165.

GEIGER, R.: Das Klima der bodennahen Luftschicht. 4. Aufl., Braunschweig: Vieweg 1961

GEORGII, H.W.: The effects of air–pollution on urban climates. In: WMO 1970, S. 214 – 237.

GOLDREICH, Y.: Computation of the magnitude of Johannesburg's heat island. Notos 19 (1970), S. 95 – 106.

GOLDREICH, Y.: Influence of topography on Johannesburg's temperature distribution. S.Afr.Geogr.J. 53 (1971), S. 84 – 88

GOSSMANN, H. + NÜBLER, W.: Oberflächentemperaturen und Vegetationsverteilung in Freiburg: Zweikomponentenbilder als Hilfsmittel bei der Auswertung von MSS–

Daten. Bildmessung und Luftbildwesen 45 (1977), S. 105 – 113.

GUTMAN, D.P. + TORRANCE, K.E.: Response of the urban boundary layer to heat addition and surface roughness. Boundary–Layer Meteor. 9 (1975), S. 217 – 233.

GUTSCHE, A.: Zur interdiurnen Veränderung der Temperatur über Berlin. Meteor.Rundschau 10 (1958), S. 186 – 189.

HAGE, K.D.: Nocturnal temperatures in Edmonton, Alberta. J.Appl.Meteor. 11 (1972), S. 123 – 129.

HAGGETT, P. + CHORLEY, R.J.: Models, paradigms, and the new geography. In: R.J. CHORLEY + P. HAGGETT (Hg.): Models in geography. London: Methuen 1967, S. 19 – 41.

HAMM, J.M.: Untersuchungen zum Stadtklima von Stuttgart. Tübingen: Selbstverlag d. Geogr. Inst. 1969. (Tübinger Geogr. Studien, H. 29)

HARLFINGER, O.: Die Strömungsverhältnisse im Stadtgebiet. In: Untersuchung der stadtklimatischen und lufthygienischen Verhältnisse der Stadt Freiburg i. Br.. Freiburg 1974, S. 17 – 26.

HARLFINGER, O.: Die bioklimatische Bedeutung des 'Höllentälers' für Freiburg. Meteor.Rundschau 26 (1976), S. 15 – 18.

HARVEY, D.: Explanation in geography. London: Arnold 1969.

HERRMANN, R. + MEISER, B.: Untersuchungen über die zeitliche und räumliche Änderung des Temperaturfeldes im Stadtgebiet von Gießen. Erde 104 (1973), S. 226 - 246.

HESS, P. + BREZOWSKY, H.: Katalog der Großwetterlagen Europas. Bad Kissingen 1952. (Ber.d.Dt. Wetterdienst–US Zone, Bd. 5, Nr. 33)
(2. erg. Aufl., Offenbach 1969, Ber. d. DWD, Bd. 15, Nr. 113)

HEUSELER, H.: Extreme Temperaturdifferenzen Stadt–Land in Strahlungsnächten. Umschau 65 (1965), S. 60 – 61.

HEYER, E.: Witterung und Klima. 2. Aufl., Leipzig: Teubner 1972.

HIRT, F.H.: Infrarot–Wärmeaufnahmen: Die Darstellung der Großstadtlandschaft Ruhrgebiet im Wärmebild. In: Luftaufnahmen II. Essen 1975. (Schriftenreihe des Siedlungsverbandes Ruhrkohlenbezirk, H. 58) S. 99 – 122.

HOFFMANN, G., MALKOWSKI, G., HEUSELER, H.: Versuchsflug mit einem Hubschrauber über West–Berlin zur Erprobung einer elektrischen Temperaturmeßeinrichtung für die Untersuchung des sog. Stadteinflusses auf die Temperaturverteilung in der Höhe. Berliner Wetterkarte, Beilage 129/65 SO 50/65 (16.12.1965).

HOWARD, L.: The climate of London deduced from meteorological observations made in the metropolis and at various places around it. 2. Aufl., London: Arch & Longman 1833.

HUTCHEON, R.J., JOHNSON, R.H., LOWRY, W.P., BLACK, C.H., HADLEY, D.: Observations of the urban heat island in a small city. Bull.Amer.Meteor.Soc. 48 (1967), S. 7 – 9.

JAUREGUI, E.: The urban climate of Mexico City. Erdkunde 27 (1973), S. 298 – 307.

JURKSCH, G.: Ein Beitrag zur Vertikalstruktur des 'Höllentälers' bei ausgewählten Wetterlagen. Unveröffentl. Manuskript 1974.

KALB, M.: Einige Beiträge zum Stadtklima von Köln. Meteor. Rundschau 15 (1962), S. 92 – 99.

KESSLER, A.: Über den Tagesgang der Oberflächentemperatur in der Bonner Innenstadt an einem sommerlichen Strahlungstag: Ein Beitrag zur Infrarotthermometrie. Erdkunde 25 (1971), S. 13 – 20.

KESSLER, A.: Zur Klimatologie der Strahlungsbilanz an der Erdoberfläche. Erdkunde 27 (1973), S. 1 – 10.

KNOCH, K.: Die Landesklimaaufnahme; Wesen und Methodik. Offenbach: DWD 1963. (Ber.d.DWD Bd. 12, Nr. 85)

KLUG, H.: Die meteorologischen Bedingungen starker Immissionsanreicherungen. Zeitschr. Staub 25 (1965), S. 410 – 416.

KOPEC, R.J.: Further observations of the urban heat island in a small city. Bull.Amer.Meteor. Soc. 51 (1970) S. 602 – 606.

KRATZER, A.: Das Stadtklima. 2. Aufl., Braunschweig: Vieweg 1956. (Reihe 'Die Wissenschaft', Bd. 90)

KRATZER, A.: Beiträge zum Münchner Stadtklima. Wetter und Leben 20 (1968), S. 110–116.

KUHNKE, W. + KLEIN, E.: Erläuterung zur Dezimalklassifikation des Wettergeschehens. Offenbach: DWD 1969. (Ber.d.DWD Nr. 114, Anhang, S. 114/29–37.

LANDSBERG, H.E.: The climate of towns. In: W.L. Thomas (Hg.): Man's role in changing the face of the earth. Chicago: Chicago UP 1956, S. 584 – 606.

LANDSBERG, H.E.: Micrometeorological temperature differentiation through urbanization. In: WMO 1970, S. 129 – 136.

LANDSBERG, H.E.: Man–made climatic changes. Science 170 (1970), S. 1265 – 1274.

LANDSBERG, H.E.: Inadvertent atmospheric modification through urbanization. In: W.N. HESS (Hg.): Weather and climate modification. New York: Wiley 1974, S. 726 – 763.

LANDSBERG, H.E.: The urban area as target for meteorological research. Bonner Met. Abh. 17 (1974), S. 475 – 480.

LANDSBERG, H.E. + MAISEL, T.N.: Micrometeorological observations in an area of urban growth. Boundary–Layer Meteor. 2 (1972), S. 365 – 370.

LEE, R.L. + OLFE, D.B.: Numerical calculations of temperature profiles over an urban heat island. Boundary–Layer Meteor. 7 (1974), S. 39 – 52.

LESER, H.: Physiogegraphische Untersuchungen als Planungsgrundlagen für die Gemarkung Esslingen am Neckar. Geogr. Rundschau, 25 (1973), S. 308 – 318.

LINDQVIST, S.: Indikering av bebyggelse – och topografibetingade temperaturdifferenser med infrarödteknik. Svensk Geogr.Årsbok 43 (1967), S. 212 – 225.

LINDQVIST, S.: Studies on the local climate in Lund and its environs. Geografiska Annaler (A) 50 (1968), S. 79 – 93.

LINKE, F. + DE RUDDER, B.: Biologie der Großstadt. Dresden–Leipzig: Steinkopf 1940. (S. 75 – 90: Das Klima der Großstadt)

LORENZ, D.: Temperaturmessungen von Boden– und Wasseroberflächen von Luftfahr-

zeugen aus. Pure and Applied Geophysics 67 (1967), S. 197 – 220.

LORENZ, D.: Zur Problematik der Fernerkundung der Erdoberfläche mit Hilfe der thermischen Infrarotstrahlung. Bildmessung u. Luftbildwesen 39 (1971), S. 235 – 242.

LORENZ, D.: Untersuchungen zum Verhalten nächtlicher Kaltluftflüsse am Taunus unter Verwendung von Wärmebildern. In: Reg.Planungsgem. Untermain (Hg.): Lufthygien.–meteor. Modellunters., 3 Arb.bericht, S. 23 – 50, Frankfurt 1972.

LORENZ, D.: Problems of airborne infrared scanning in meteorology. Arch.Met.Geophys. Bioklim., Serie B, 21 (1973 a), S. 125 – 146.

LORENZ, D.: Die radiometrische Messung der Boden– und Wasseroberflächentemperatur und ihre Anwendung auf dem Gebiet Meteorologie. Z.f.Geophysik 39 (1973 b) S. 627 – 701.

LOSSNITZER, H.: Einige Bemerkungen zum Klima Freiburgs i. Br.. Z.f. angew. Meteor. /Das Wetter 59 (1942) S. 37 – 42.

LOSSNITZER, H. + FREUDENBERG, H.: Temperaturmeßfahrten im Gebiete der Stadt Freiburg im Breisgau. Bioklim. Beiblätter H. 1/2 (1940). S. 30 – 39.

LOUW, W.J. + MEYER, J.A.: Near surface nocturnal winter temperatures in Pretoria. Notos 14 (1965), S. 49 – 56.

LOWRY, W.P.: The climate of cities. Scientific American 217 (1967), S. 15 – 23.

LOWRY, W.P.: Weather and life. New York–London: Academic Press 1969.

LUDWIG, F.L.: Urban temperature fields. In: WMO 1970, S. 80 – 107.

MACHALEK, A.: Das vertikale Temperaturprofil über der Stadt Wien. Wetter und Leben 26 (1974), S. 87 – 93.

MARSAL, D.: Statistische Methoden für Erdwissenschaftler.Stuttgart: Schweizerbart 1967.

McELROY, J. L.: A numerical study of the nocturnal heat island over a medium–sized mid–latitude city (Columbus, Ohio). Boundary–Layer Meteor. 3 (1973). S. 442 – 453.

MÖLLER, F.: Einführung in die Meteorologie. 2 Bd., Mannheim: Bibl.Institut 1973.

MUNN, R.E.: Descriptive Micrometeorology. New York–London: Academic Press 1966.

MUNN, R.E.: Airflow in urban areas. In: WMO 1970, S. 15 – 39.

MUNN, R.E., HIRT, M.S., FINDLAY, B.F.: A climatological study of the urban temperature anomaly in the lakeshore environment at Toronto. J. Appl.Meteor. 8 (1969), S. 411 – 437.

MYRUP, L.O.: A Numerical model of the urban heat island. J.Appl.Meteor. 8 (1969), S. 908 – 918.

NEUWIRTH, R.: Das Bioklima der Stadt Freiburg. Mitt.d.bad. Landesver.f.Naturkunde u. Naturschutz NF 10 (1971), S. 487 – 498. (erschienen 1972)

NÜBLER, W.: Verteilung der Lufttemperatur an ausgesuchten Strahlungswettertagen. In: Untersuchung . . . (s.d.) (1974), S. 30 – 38.

NÜBLER, W.: Lokalklimatische Untersuchungen als Beitrag zur ökologisch–wertenden Differenzierung des Stadtgebiets von Freiburg. Daten und Dokumente zum Umweltschutz, hg. v. Univ. Hohenheim Nr. 14 (1975), S. 83 – 94.

NÜBLER, W.: Möglichkeiten des Nachweises von Kaltluftsammelgebieten und Kaltluftbewegungen aus Thermalbildern. In: Berichte zum Symposium Flugzeugmeßprogramm. Bundesminister für Forschung und Technologie, Forschungsbericht W 78-04, 1978, S. 207 - 216.

NÜBLER, W.: Wind-induced microclimatic differences detected from thermal scanner data. In: ISP/IUFRO Symposium Freiburg, Freiburg, 1979,Vol. II, S. 1039 - 1050.

OKE, T.R.: City size and the urban heat island. Atmosph. Environment 7 (1973), S. 769 – 779.

OKE, T.R.: Review of urban climatology, 1968 – 1973. Genf: WMO 1974. (WMO Technical Note No. 134)

OKE, T.R. + EAST, C.: The urban boundary layer in Montreal. Boundary–Layer Meteor. 1 (1970), S. 411 – 437.

OKE, T.R. + FUGGLE, R.F.: Comparison of urban/rural counter and net radiation at night. Boundary–Layer Meteor. 2 (1972), S. 290 – 308.

OKE, T.R. + HANNELL, F.G.– The form of the urban heat island in Hamilton, Canada. In: WMO 1970, S. 113 – 126.

OKE, T.R. + MAXWELL, G.B.: Urban heat island dynamics Montreal and Vancouver. Atmosph.Environment 9 (1975), S. 191 – 200.

OUTCALT, S.I.. A synthetic analysis of seasonal influences in the effects of land use on the urban thermal regime. Arch.Meteor.Geophys.Bioklim., Serie B 20 (1972), S. 253 – 260.

PARRY, J.: Local temperature variations in the Reading area. Quart.J.Royal Meteor. Soc. 82 (1956), S. 47 – 57.

PEPPLER, A.: Das Auto als Hilfsmittel der meteorologischen Forschung. Das Wetter/ Z.f.angew.Meteor. 46 (1929), S. 305 – 308.

PEPPLER, A.: Die Temperaturverhältnisse von Karlsruhe an heißen Sommertagen. Dt.Meteorolog.Jb.f. 1929 (= Veröff. d.Bad.Landeswetterkarte Nr. 16) S. 59 – 60. (ersch. 1930)

PETERSON, J.T.: The climate of the city. In: T. DETWYLER (Hg.) 1971, S. 131 – 154.

PFLÜGER, H.: Lage und Klima der Kurstadt Freiburg. Freiburg 1933.

POOLER, F.: Airflow over a city in terrain of moderate relief. J.Appl.Meteor. 2 (1063), S. 446 – 456.

PRESTON–WHYTE, RA.: A spatial model of the urban heat island. J.Appl.Meteor. 9 (1970), S. 571 – 573.

QUITT, E.: Meßfahrten als eine der Methoden der mesoklimatischen Erforschung. Studia Geograpica (Brno/Brünn) 26 (1972), S. 143 – 157.

Regionale Planungsgemeinschaft Untermain, Frankfurt (Hg.): Lufthygienisch–meteorologische Modelluntersuchung in der Region Untermain, 1. – 5. Arbeitsbericht. Frankfurt 1970, 1971, 1972, 1972, 1974.

v. RUDLOFF, H.: Besonderheiten im Klima von Freiburg. Mitt. d.Bad.Landesver.f.Naturkunde u. Naturschutz NF 5 (1951), S. 1 – 17.

v. RUDLOFF, H.: Klima und Wetter im Kreise Freiburg im Breisgau. Diss. Freiburg 1957.

v. RUDLOFF, H.: Das Freiburger Klima. Freiburger Stadthefte, hg. v. Städt. Presseamt, Freiburg o.J. [1971]

SANTOS, M.: Les villes du tiers monde. Paris: Editions Génin 1971.

SCHERHAG, R.: Neue Methoden der Wetteranalyse und Wetterprognose. Berlin—Göttingen—Heidelberg: Springer 1948.

SCHIRMER, H.: Betrachtungen zum Stadtklima. In: Die Mittelstadt. Hannover 1969 (Veröff.d.Akad.f.Raumforschung u. Landesplanung, Forschungen u. Sitzungsberichte 52).

SCHMIDT, K. Die Windverhältnisse in Freiburg an heiteren Sommertagen. Dt.Meteorolog. Jb.f. 1932 (= Veröff.d.Bad. Landeswetterwarte Nr. 20) S. 80 – 83. (erschienen 1933)

SCHMIDT, W.: Die Verteilung der Minimumtemperaturen in der Frostnacht des 12.5.1927 im Gemeindegebiet von Wien. Fortschr. d. Landwirtschaft 21 (1927), H. 2, S. 681 – 686.

SCHMIDT, W.: Kleinklimatische Aufnahme durch Temperaturfahrten. Meteor.Zeitschr. 47 (1930), 92 – 106.

SCHREIBER, H.: Freiburg im Breisgau mit seinen Umgebungen. 3. Aufl., Freiburg: Herder 1840. (Limitierter Faksimiledruck: Freiburg 1970)

SCHULTHEISS, C.: Über einige Eigentümlichkeiten des Klimas von Freiburg. Das Wetter H. 6/7 (1896).

SCHULZE, P.: Die horizontale Temperaturverteilung in Großstädten, insbesondere die West—Berlins in winterlichen Strahlungsnächten. Berlin: Reimer 1969. (Inst.Meteor.Geophys.FU Berlin, Meteor.Abhandl. Bd. 91, H.2)

SCHWINEKÖPER, B.: Historischer Plan der Stadt Freiburg im Breisgau (vor 1850). Freiburg 1975 (Veröff.d.Archivs d.Stadt Freiburg, Nr. 14)

SELLERS, W.D.: Physical climatology. 2. Aufl., Chicago: Univ. of Chicago Press 1965.

SHARON, D. + KOPLOWITZ, R.: Observatic ns of the heat island of a small town. Meteor. Rundschau 25 (1972), S. 143 – 146.

[SMIC—Report] Inadvertent climate modification: Report of the study of man's impact on climate. Cambridge, Mass.: The MIT Press 1971.

STEINHAUSER, F.: Die Windverhältnisse im Stadtgebiet von Wien. Wien 1970. (Arb. Zentralanstalt f.Meteor.u.Geodynamik, H. 8)

SUMMERS, P.W.: An urban ventilation model applied to Montreal. Ph.D. Thesis, Montreal: McGill Univ. 1964.

SUNDBORG, Å.: Local climatological studies of the urban temperature conditions in an urban area. Tellus 2 (1950), S. 222 – 232.

SUNDBORG, Å.: Climatological studies in Uppsala, with special regard to the temperature conditions in the urban area. Uppsala 1951. (Geographica No. 22, Skrifter från Uppsala Universitets Geografiska Institution)

TERJUNG, W.: Urban energy balance climatology: A preliminary investigation of the city—man system in downtown Los Angeles. Geogr.Review 60 (1970), S. 31 – 53.

TERJUNG, W.: The energy balance climatology of a city—man system. Ann.Assoc.Amer. Geogr. 60 (1970), S. 466 – 492.

THOMAS, L.: Kurze Bemerkungen über das Klima von Freiburg im Breisgau. Freiburg: Poppen 1884.

THOMAS, L.: Über das Klima und die Einrichtungen für öffentliche Gesundheitspflege von Freiburg im Breisgau. Freiburg 1904.

TYSON, P.D., DU TOIT, W., FUGGLE, R.F.: Temperature structure above cities:

Review and preliminary findings form the Johannesburg urban heat island project. Atmos.Environment 6 (1972), S. 533 – 542.

[UN =] United Nations: Demographic Yearbook 1948 ff. New York: UN 1949 ff.

United Nations: Growth of the world's urban and rural population 1920 – 2000. New York: UN 1969. (Population Studies No. 44)

Untersuchung der stadtklimatischen und lufthygienischen Verhältnisse der Stadt Freiburg im Breisgau. Arbeitsbericht einer interdisziplinären Arbeitsgruppe. Hg. v. Stadtplanungsamt, Freiburg 1974

WEISCHET, W.: Die räumliche Differenzierung klimatologischer Betrachtungsweisen: Ein Vorschlag zur Gliederung der Klimatologie und zu ihrer Nomenklatur. Erdkunde 10 (1956), S. 109 – 122.

WEISCHET, W.: Notwendigkeit und Möglichkeit einer raum– und klimagerechten Fassung der 'Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft' (TA–Luft). The Hague: Junk 1974 a. (Verb.d.Ges.f.Ökologie, Saarbrücken 1973)

WEISCHET, W.: Innerstädtische Klimadifferenzierung aufgrund von thermischen und hygienischen Meßwerten. / Das thermische Verhalten der Oberflächen bei unterschiedlicher Baukörperstruktur mit A. GEHRKE. In: Untersuchung . . . (s.d.) 1974 b, S. 27 – 29 / 41 – 43.

WMO = World Meteorological Organization (Hg.): Urban Climates. Genf: WMO 1970 b. (WMO Technical Note No. 108).

World Metorological Organization (Hg.).: Selected bibliography on urban climates. Genf: WMO 1970 a.

YAP. D. + OKE, T.R.: Sensible heat flux over an urban area – Vancouver, B.C. . J.Appl.Meteor. 13 (1974), S. 880 – 890.

YUDCOVITCH, N.: Factors influencing the temperature variation at Calgary. The Albertan Geogr. 3 (1966/67), S. 11 – 19.

ZACHARIAS, F.: Blüphaseneintritt an Straßenbäumen (insbesondere Tilia x euchlora KOCH) und Temperaturverteilung in Westberlin. Diss. Berlin 1972.